

# **OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN DISPOSITIVOS MÓVILES PARA SU USO EN ZONAS RURALES AISLADAS ABASTECIDAS CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**



Autor: Sergio Hernán Rocabado Moreno

Director: Carlos Cadena (UNSa)

Codirector: Javier Diaz (UNLP)

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Informáticas  
Facultad de Informática – Universidad Nacional de La Plata  
Mayo de 2020

Dedico este trabajo a mis hijos

## Agradecimientos

A mi familia, por el amor, la comprensión, el cariño y el apoyo incondicional en todo momento para seguir adelante.

A la Universidad Nacional de La Plata por brindarme un marco y un contexto para coincidir con extraordinarios profesionales, que participaron en mi proceso de formación.

A la Universidad Nacional de Salta y al Consejo de investigación de la UNSa, por financiar el equipamiento utilizado y los viajes a las Escuelas rurales aisladas.

Al Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional (INENCO), por brindarme acceso a sus laboratorios y campo experimental fotovoltaico para realizar pruebas y mediciones.

A mi director, Carlos Cadena, por todo lo que me enseñó.

A mi codirector, Javier Díaz, por apoyar esta investigación.

A Emilce y Susana por todos sus consejos y por motivarme en los momentos más difíciles.

A mis alumnos Janet, Cesar y Gabriel por su compromiso al realizar el trabajo de campo y las mediciones, demostrando una gran paciencia para trabajar con los niños.

A los maestros de las escuelas rurales, por su cooperación y participación en las experiencias educativas realizadas.

A las niñas y niños de las escuelas, por las ganas y voluntad que pusieron para sacar adelante esta investigación. **“Muchas gracias”** por todo el afecto que nos brindaron, nos hicieron sentir como en casa.



## Resumen

Las zonas rurales aisladas de Argentina se caracterizan, entre otros aspectos, por su baja densidad demográfica, población dispersa, cobertura de red celular limitada y carencia de servicios básicos entre los cuales el de distribución de energía eléctrica. Los habitantes de estos lugares utilizan energías alternativas, como paneles solares y grupos electrógenos, para cubrir necesidades energéticas elementales.

En estas regiones las posibilidades de acceso a la información digital son prácticamente inexistentes debido a que es muy difícil suministrar energía eléctrica a los equipos computacionales. Sin embargo, los dispositivos móviles se constituyen en una alternativa viable, debido a su bajo consumo energético en comparación a las computadoras convencionales.

Se presenta una investigación sobre el consumo de energía de los dispositivos móviles en zonas aisladas y diferentes mecanismos para reducir el consumo energético y optimizar el uso de la energía disponible. El trabajo experimental se realizó en comunidades educativas rurales aisladas del Noroeste Argentino (NOA), con la participación de maestros y alumnos de diferentes grados. Se desarrollaron dos modelos para aplicar en zonas rurales aisladas, el primero estima la energía requerida para ejecutar tareas de uso frecuente y el segundo determina la energía disponible por hora. Para automatizar y facilitar el uso de ambos modelos, se construyó un prototipo que mide la energía disponible y se desarrolló una aplicación móvil que se comunica con el prototipo, lee los valores de las mediciones, aplica el modelo y presenta las estimaciones.

Como parte de la investigación, se efectuó una revisión bibliográfica de las principales temáticas abordadas, a partir de la cual se elaboró el marco teórico de la tesis incorporando características tecnológicas que fueron fundamentales para realizar el trabajo experimental.

Los resultados de la investigación se aplicaron exitosamente en un caso de estudio desarrollado en una escuela rural aislada de la Provincia de Salta. Se realizó una experiencia educativa mediada por dispositivos móviles, utilizando paneles solares fotovoltaicos portátiles para suministrar energía a los dispositivos móviles. La experiencia se planificó en función de los requerimientos energéticos de los dispositivos y de la energía solar disponible en la zona, utilizando el prototipo y la aplicación móvil para efectuar las estimaciones. Se destacan la motivación, el entusiasmo por participar y la buena recepción de la tecnología por parte de docentes y alumnos.

La discusión aborda diversos hallazgos y problemáticas que surgieron durante el desarrollo del trabajo experimental y caso de estudio. Se concluye que la reducción y optimización del consumo energético en dispositivos móviles posibilitan su utilización en zonas rurales aisladas aprovechando el principal recurso energético disponible (La Energía Solar), proporcionando a los pobladores de estas zonas acceso a las tecnologías de la información y comunicación.

## **Abstract**

The isolated rural areas of Argentina are characterized, among other aspects, by their low demographic density, scattered population, limited cellular network coverage and lack of basic services, including electricity distribution. The population of these places uses alternative energy, like solar panels and generator sets to handle elemental energy needs.

In these regions, the possibilities of accessing digital information are practically non-existent because it is very difficult to supply electrical energy to computer equipment. However, mobile devices are a viable alternative, due to their low energy consumption compared to conventional computers.

A Research is presented about the energy consumption of mobile devices in isolated areas and different mechanisms to reduce energy consumption and optimize the use of available energy. The experimental field work was carried out in isolated rural educational communities in the Northwest of Argentina, with the participation of teachers and students from different grades of school. Two models were developed to apply in isolated rural areas, the first estimates the energy required to perform frequently used tasks and the second determines the energy available per hour. To automate and facilitate the use of both models, a prototype was built that measures the available energy and a mobile application was developed that communicates with the prototype, reads the values of the measurements, applies the model and presents the estimates.

As part of the research, a bibliographic review of the main topics addressed was carried out, from which the theoretical framework of the thesis was elaborated incorporating technological features that were fundamental to carry out the experimental work.

The results of the investigation were successfully applied in a case study developed in an isolated rural school in the Province of Salta. A mobile mediated educational experience was conducted using portable photovoltaic solar panels to supply power to mobile devices. The experience was planned based on the energy requirements of the devices and the solar energy available in the area, using the prototype and the mobile application to make the estimates.

The discussion addresses various findings and problems that arose during the development of the experimental work and case study. It is concluded that the reduction and optimization of energy consumption in mobile devices make it possible to use it in isolated rural areas, taking advantage of the main available energy resource (Solar Energy), providing the habitants of these areas with access to information and communication technologies.

# INDICE DE CONTENIDO

|   |          |
|---|----------|
| <b>Capítulo 1: Introducción .....</b>                             | <b>1</b> |
| 1.1 Motivación .....  | 1        |
| 1.2 Hipótesis .....   | 2        |
| 1.3 Objetivos .....   | 2        |
| 1.3.1 Objetivo general .....                                      | 2        |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....                                 | 2        |
| 1.4 Líneas de Investigación .....                                 | 3        |
| 1.5 Contribuciones .....  | 3        |
| 1.6 Publicaciones .....   | 4        |
| 1.7 Estructura de la tesis .....                                  | 5        |
| <b>Capítulo 2: Marco Teórico .....</b>                            | <b>7</b> |
| 2.1 Conceptos eléctricos .....                                    | 7        |
| 2.1.1 Potencia y Energía .....                                    | 7        |
| 2.1.2 Eficiencia energética .....                                 | 10       |
| 2.1.3 Consumo energético y rendimiento .....                      | 10       |
| 2.2 Baterías .....  | 11       |
| 2.2.1 Tipos de batería .....                                      | 12       |
| 2.2.2 Ciclo de carga de una batería .....                         | 12       |
| 2.2.3 Energía acumulada en las baterías .....                     | 13       |
| 2.2.4 Tiempo de carga .....                                       | 14       |
| 2.2.5 Tiempo de descarga .....                                    | 15       |
| 2.2.6 Consumo eléctrico .....                                     | 15       |
| 2.2.7 Buenas prácticas para el uso de baterías .....              | 15       |
| 2.3 Tecnologías de Carga .....                                    | 17       |
| 2.3.1 Carga USB .....   | 17       |
| 2.3.2 Carga rápida .....  | 18       |
| 2.3.3 Quick Charge de Qualcomm .....                              | 19       |
| 2.4 Medición del consumo energético en dispositivos móviles ..... | 22       |
| 2.4.1 Terminología básica .....                                   | 22       |
| 2.4.2 Estado del arte .....                                       | 23       |
| 2.4.3 Herramientas para medir el consumo de energía .....         | 29       |
| 2.4.3.1 Herramientas de Hardware .....                            | 30       |
| 2.4.3.2 Herramientas de Software .....                            | 32       |
| 2.5 Medición del rendimiento en dispositivos móviles .....        | 37       |
| 2.5.1 Latencia .....  | 38       |
| 2.5.2 Throughput .....  | 39       |
| 2.5.3 Herramientas para medir el rendimiento .....                | 40       |
| 2.5.3.1 Ping .....  | 40       |
| 2.5.3.2 Iperf .....   | 41       |
| 2.6 Energía solar fotovoltaica .....                              | 43       |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.6.1   | Paneles fotovoltaicos .....   | 45        |
| 2.6.2   | Irradiancia solar .....   | 47        |
| 2.6.3   | Tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito de una celda. .... | 47        |
| 2.6.4   | Curva de Intensidad-Voltaje (I-V).....                                      | 48        |
| 2.6.5   | Eficiencia del módulo fotovoltaico.....                                     | 49        |
| 2.6.6   | Influencia de la radiación en la eficiencia del módulo .....                | 50        |
| 2.6.7   | Influencia de la temperatura en la eficiencia del módulo .....              | 50        |
| 2.6.8   | Hora Solar Pico .....   | 54        |
| 2.6.9   | Mapas solares .....   | 55        |
| 2.6.10  | Conexión de las celdas solares .....  | 57        |
| 2.7   | Recarga de dispositivos móviles basada en energía solar fotovoltaica.....   | 58        |
| 2.7.1   | Uso de cargadores solares portátiles.....                                   | 60        |
| <b>Capítulo 3: Aspectos Metodológicos.....</b>                    |   | <b>62</b> |
| 3.1   | Descripción .....   | 62        |
| 3.1.1   | Selección del ámbito de trabajo.....  | 62        |
| 3.1.2   | Medición del consumo .....  | 64        |
| 3.1.3   | Metodología para deducir el modelo de consumo. ....                         | 65        |
| 3.1.4   | Metodología para construir el modelo de energía disponible. ....            | 66        |
| 3.2   | Aplicación.....   | 68        |
| <b>Capítulo 4: Reducción del consumo de energía.....</b>          |   | <b>70</b> |
| 4.1   | Caracterización del consumo energético .....                                | 70        |
| 4.2   | Reducción del consumo de energía en el dispositivo móvil .....              | 72        |
| 4.3   | Reducción del consumo de energía en las comunicaciones.....                 | 73        |
| 4.3.1   | Tecnologías de telefonía celular disponibles en zonas aisladas.....         | 74        |
| 4.3.2   | Equipamiento utilizado.....   | 75        |
| 4.3.2.1   | Servidor.....   | 75        |
| 4.3.2.2   | Dispositivos Móviles.....   | 76        |
| 4.3.3   | Escenarios de comunicación.....   | 76        |
| 4.3.3.1   | Conexión directa .....  | 77        |
| 4.3.3.2   | Piconet Bluetooth.....  | 78        |
| 4.3.3.3   | Mobile Hotspot .....  | 80        |
| 4.3.4   | Métricas utilizadas.....  | 82        |
| 4.3.5   | Mediciones realizadas .....   | 83        |
| 4.3.6   | Resultados .....  | 84        |
| 4.3.6.1   | Latencia ICMP .....   | 84        |
| 4.3.6.2   | Throughput TCP .....  | 85        |
| 4.3.6.3   | Consumo de energía.....   | 85        |
| 4.3.6.4   | Ventajas y desventajas de cada escenario .....                              | 88        |
| 4.3.7   | Conclusiones del capítulo.....  | 89        |
| <b>Capítulo 5: Modelos de energía requerida y disponible.....</b> |   | <b>90</b> |
| 5.1   | Resumen .....   | 90        |
| 5.2   | Consumo energético .....  | 91        |
| 5.2.1   | Incremento de energía producido por incremento de tiempo .....              | 92        |
| 5.2.2   | Incremento de energía producido por incremento de potencia.....             | 93        |
| 5.3   | Construcción del modelo de energía requerida.....                           | 94        |
| 5.3.1   | Modificación del tiempo de ejecución.....                                   | 95        |
| 5.3.2   | Modificación de la potencia .....   | 96        |
| 5.3.3   | Energía requerida .....   | 100       |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 5.3.4  | Criterios para tipificar los parámetros .....                           | 100        |
| 5.3.4.1  | Nivel de interacción de una aplicación .....                            | 100        |
| 5.3.4.2  | Capacidad de manejo de un usuario .....                                 | 102        |
| 5.3.4.3  | Gama de un dispositivo .....  | 102        |
| 5.3.4.4  | Nivel de Brillo de la pantalla .....                                    | 103        |
| 5.3.5  | Validación del modelo.....  | 104        |
| 5.4  | Construcción del modelo de energía disponible .....                     | 108        |
| 5.4.1  | Cálculo de la energía por hora a partir de la radiación solar .....     | 109        |
| 5.4.2  | Cálculo de la energía por hora a partir de la potencia entregada .....  | 111        |
| 5.5  | Vinculación del modelo de consumo y modelo de energía .....             | 115        |
| 5.6  | Generalización del modelo de energía requerida para n tareas.....       | 116        |
| 5.7  | Aplicación de los modelos .....   | 117        |
| <b>Capítulo 6: Aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica.....</b> |   | <b>118</b> |
| 6.1  | Resumen .....   | 118        |
| 6.2  | Optimización de la potencia entregada por un panel fotovoltaico.....    | 118        |
| 6.2.1  | Configuración 1: 2 filas en paralelo y 18 celdas en serie por fila..... | 119        |
| 6.2.2  | Configuración 2: 3 filas en paralelo y 12 celdas en serie por fila..... | 120        |
| 6.3  | Prototipo para gestionar la energía disponible.....                     | 121        |
| 6.3.1  | Panel solar .....   | 122        |
| 6.3.2  | Placa de control Arduino UNO R3.....                                    | 122        |
| 6.3.3  | Módulo registrador de datos.....  | 123        |
| 6.3.3.1  | Adaptador SD para Arduino.....  | 124        |
| 6.3.3.2  | Reloj de Tiempo Real RTC DS3231.....                                    | 125        |
| 6.3.3.3  | Sensor de corriente.....  | 125        |
| 6.3.3.4  | Sensor de temperatura.....  | 127        |
| 6.3.3.5  | Código simplificado para el registrador.....                            | 128        |
| 6.3.4  | Adaptador USB OTG .....   | 129        |
| 6.3.5  | Aplicación móvil para la Gestión Inteligente de Recarga Solar .....     | 129        |
| <b>Capítulo 7: Caso de estudio.....</b>                                  |   | <b>132</b> |
| 7.1  | Resumen .....   | 132        |
| 7.2  | Contexto.....   | 132        |
| 7.3  | Descripción .....   | 134        |
| 7.4  | Implementación .....  | 134        |
| 7.4.1  | Preparación.....  | 134        |
| 7.4.2  | Instalación del prototipo.....  | 135        |
| 7.4.3  | Configuración de GIRaSol.....   | 136        |
| 7.4.3.1  | Energía disponible.....   | 137        |
| 7.4.3.2  | Energía requerida .....   | 138        |
| 7.4.4  | Planificación de la clase .....   | 142        |
| 7.4.5  | Configuración de los dispositivos móviles.....                          | 143        |
| 7.4.6  | Configuración del escenario de comunicaciones.....                      | 143        |
| 7.4.7  | Desarrollo de la clase .....  | 144        |
| 7.5  | Resultados.....   | 145        |
| <b>Capítulo 8: Conclusiones y Discusión.....</b>                         |   | <b>147</b> |
| <b>Lista de Figuras .....</b>  |   | <b>150</b> |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Lista de Tablas.....</b>                     | <b>153</b> |
| <b>Lista de Acrónimos y Abreviaciones .....</b> | <b>154</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>                        | <b>155</b> |

# Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se introduce al lector en los aspectos generales que se abordan en la tesis. En primer lugar, se realiza una descripción de las zonas rurales aisladas de Argentina, haciendo hincapié en las carencias y limitaciones que dificultan el uso de dispositivos móviles en estas regiones. A continuación, se plantea la hipótesis y se mencionan los objetivos generales y específicos del trabajo. Finalmente, se presentan las contribuciones y publicaciones generadas por la tesis.

## 1.1 Motivación

En Argentina la ruralidad comprende realidades muy diferentes. Por un lado, las poblaciones rurales agrupadas que habitan en pequeñas localidades de menos de dos mil habitantes, y por otro las poblaciones rurales dispersas que habitan en zonas a territorio abierto sin constituir centros poblados. Estas zonas presentan, entre otras, las siguientes problemáticas:

- Aislamiento geográfico. Grandes distancias entre las viviendas de los pobladores y de éstas a los centros urbanos (Figura 1-1).
- Dificultades de acceso. No se dispone de caminos (o son muy precarios), ni medios de transporte. Los habitantes se movilizan a pie o usando caballos y mulas.
- Baja densidad demográfica. Número reducido de pobladores habitando un territorio extenso.
- Carencia de servicio de distribución de energía eléctrica. Los habitantes de estas zonas utilizan energías alternativas, como paneles solares y grupos electrógenos, para cubrir necesidades energéticas elementales. Es muy común el uso de velas como medio de iluminación.
- Dificultades de comunicación. Disponen de servicios de telefonía celular con cobertura limitada, razón por la cual los pobladores se tienen que ubicar en posiciones estratégicas (elevadas y con visión directa) para mejorar la ganancia de señal.



Figura 1-1: Vivienda ubicada en una zona rural aislada del NOA

La región Noroeste de Argentina (NOA) posee numerosas zonas de este tipo, donde las posibilidades de acceso a la información digital son prácticamente nulas debido a que es muy difícil suministrar energía eléctrica a los equipos computacionales [2].

Este déficit puede ser subsanado mediante el uso de dispositivos móviles (Celulares y Tabletas), que por su bajo consumo energético respecto de computadoras convencionales, se constituyen en una alternativa viable para posibilitar a los pobladores de estas zonas el acceso a la información digital, sin necesidad de trasladarse a centros urbanos.

Sin embargo, surgen los siguientes interrogantes: ¿Cuánta energía requieren los dispositivos móviles para funcionar? ¿Cómo proporcionar energía a los dispositivos? ¿De cuánta energía dispongo en la zona? ¿Cómo administrar la energía disponible? ¿Es posible optimizar el consumo energético en los dispositivos móviles para mejorar el aprovechamiento de la energía disponible en la zona?

En respuesta a estos interrogantes, se realizó una investigación sobre el consumo energético de los dispositivos móviles y de diferentes mecanismos para optimizar y reducir el consumo de energía en estos dispositivos, con la finalidad de facilitar su utilización en zonas rurales aisladas aprovechando la energía solar disponible.

## **1.2 Hipótesis**

La caracterización, reducción y optimización del consumo energético en dispositivos móviles posibilita el uso de los mismos en zonas rurales aisladas, aprovechando la energía solar disponible.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

- Desarrollar un modelo y técnicas que permitan caracterizar, reducir y optimizar el consumo energético de dispositivos móviles, para facilitar su uso en zonas rurales aisladas aprovechando la energía solar disponible.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Definir un marco teórico que sustente la investigación.
- Seleccionar métricas, técnicas y herramientas para medir el rendimiento y el consumo de energía en dispositivos móviles.
- Especificar un procedimiento para reducir el consumo energético de dispositivos móviles, sin afectar su rendimiento y confiabilidad.
- Contrastar el consumo de energía de diferentes estrategias para el despliegue de redes móviles en zonas remotas y seleccionar la que presente menor consumo.
- Deducir un modelo de consumo para estimar los requerimientos energéticos de un dispositivo móvil cuando ejecuta tareas de uso frecuente en zonas rurales aisladas.
- Definir un modelo de energía que permita determinar la cantidad de energía disponible en función de la radiación solar existente en una zona remota.
- Relacionar los modelos de consumo energético y de energía disponible y construir herramientas tecnológicas que permitan aplicar los mismos en regiones aisladas.

- Dimensionar pico sistemas fotovoltaicos optimizados para la recarga de baterías de dispositivos móviles en zonas con recursos energéticos limitados.

## 1.4 Líneas de Investigación

El trabajo realizado se centra en tres líneas de investigación, las cuales se ilustran en la Figura 1-2. A su vez, cada línea de investigación abarca diferentes temáticas, necesarias para la construcción de los modelos de energía requerida (o de consumo) y de energía disponible.

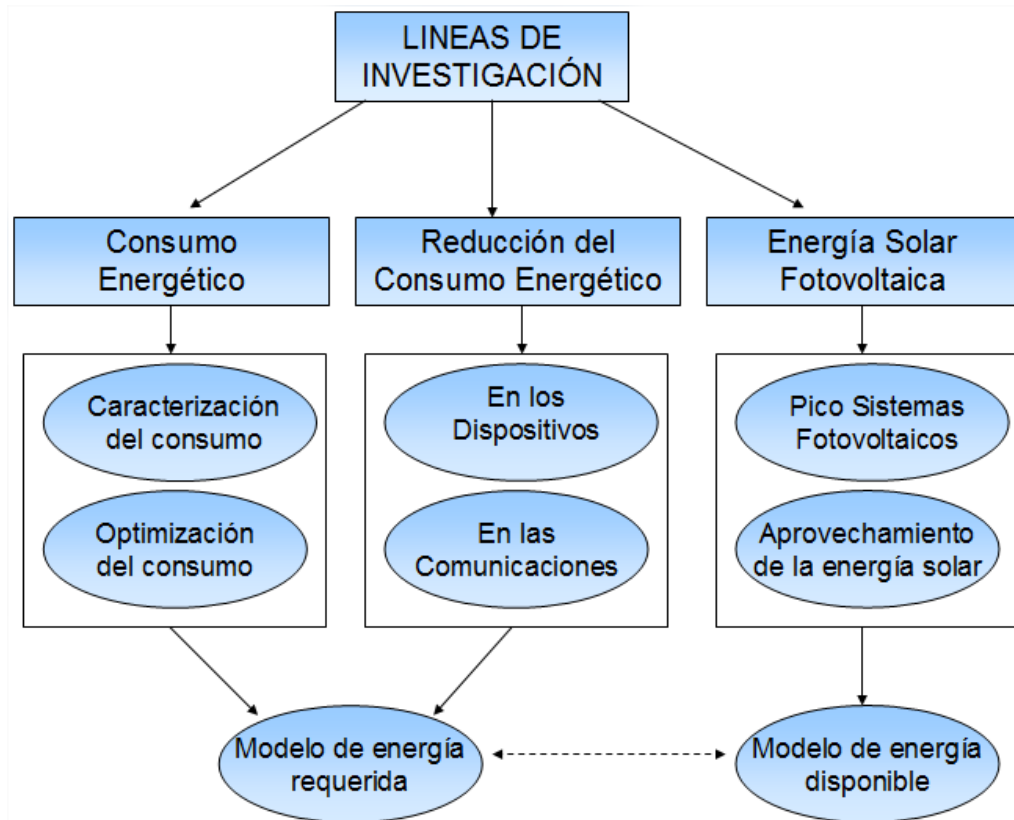


Figura 1-2: Ejes de la investigación

## 1.5 Contribuciones

Las principales contribuciones de esta tesis son las siguientes:

- Un procedimiento para reducir el consumo de energía en los dispositivos, que permite seleccionar la aplicación móvil de menor consumo para ejecutar tareas en un celular, aplicando premisas de eficiencia energética.
- Un conjunto de recomendaciones para reducir el consumo de energía en las comunicaciones, mediante el uso de tecnologías de bajo consumo energético.
- Un modelo para estimar la energía requerida para ejecutar tareas de uso frecuente en zona rural aislada, en función de parámetros propios de la zona.
- Un modelo para determinar la energía disponible por hora en zona rural aislada.

- Un prototipo para medir y almacenar los valores de tensión y corriente que entrega un panel solar en cada hora del día.
- Una aplicación móvil que implementa los modelos de energía requerida y disponible. La aplicación permite: 1) Determinar la energía que un panel puede entregar durante el día, a partir de los datos del prototipo y 2) Planificar las tareas que se pueden ejecutar en el celular en función de la energía disponible.
- Un pico sistema fotovoltaico, optimizado para entregar la potencia mínima requerida para cargar las baterías de un dispositivo móvil.

## 1.6 Publicaciones

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo de investigación asociado a esta tesis doctoral, fueron presentados en las siguientes publicaciones con referato:

1. PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA INTRODUCIR EL APRENDIZAJE MEDIADO POR TIC EN ESCUELAS RURALES AISLADAS DEL NOA. Rocabado Sergio. Comunicación completa seleccionada para su publicación. EDUTEC. Educación con Tecnología, Un compromiso social. Iniciativas y resultados de investigaciones y experiencias de innovación educativa. pp. 1843-1857. Edicions de la Universitat de Lleida. 2019. ISBN: 978-84-9144-139-7. DOI: <https://doi.org/10.21001/edutec.2019>
2. RENDIMIENTO DE REDES MÓVILES EN CIRCUITO DE TURISMO RELIGIOSO DE SANTIAGO DEL ESTERO. Rocabado Moreno Sergio, Herrera Susana, Trejo Saavedra Estéfano, Leturia Fernando. Revista de Investigaciones en Facultades de Ingeniería del NOA. pp. 445-451. ISSN: 1853-6662. Número 4, Año 2018, UNSE. <https://fcf.unse.edu.ar/index.php/portfolio/revista-codinoa-2018-investigaciones-en-facultades-de-ingenieria-del-noa>
3. PROPUESTA PARA EL USO DE TDICS EN COMUNIDADES EDUCATIVAS RURALES. UNA EXPERIENCIA EN ESCUELAS ALBERGUE. Rocabado Sergio. Cadena Carlos. CBIE (Congresso Brasileiro de Informática na Educação). Recife-PE, Brasil. Noviembre de 2017. ISSN 2316-6533. <https://www.br-ie.org/pub/index.php/wie/article/view/7221/5019>
4. M-LEARNING EN ESCUELAS RURALES AISLADAS. Rocabado Sergio, Campos Matías, Coronel Adrián, Cadena Carlos; XI Congreso de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología, TE&ET 2016. Morón, Buenos Aires, Argentina. Junio de 2016. Publicado en el libro de actas de TE&ET 2016, Págs. 507 a 513. Editorial: Universidad de Morón. ISBN: 978-987-3977-30-5. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/54628>
5. MINI SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA EL USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ZONAS RURALES: OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA ENTREGADA Y CONSUMIDA. Rocabado Moreno Sergio, Díaz Javier, Cadena Carlos; VI Congreso Brasileiro de Energía Solar, CBENS 2016. Belo Horizonte, Brasil. 4 al 7 de abril de 2016. <http://www.abens.org.br/CBENS2016/anais/anais/trabalhos/2609Ofinal.pdf>
6. CARGADORES SOLARES PORTATILES PARA EL USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ZONAS RURALES AISLADAS DEL NOA. Rocabado Sergio, Díaz Javier, Cadena Carlos; ASADES 2015. San Rafael -Mendoza, Argentina. Noviembre de 2015. Publicado en la revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA). Año 2015. ISSN 2314-1433. <http://www.asades.org.ar/biblioteca/revista-averma>
7. USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ZONAS RURALES AISLADAS ABASTECIDAS CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. Rocabado Moreno Sergio, Díaz Javier, Cadena Carlos; XXI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, CACIC 2015. Junín - Buenos Aires, Argentina. Octubre de 2015. Publicado en el libro de actas de CACIC 2015, Págs. 861 a 870. Editorial: Universidad Nacional del Noroeste de Buenos Aires. ISBN: 978-987-3724-37-4.

Además, el tesista presentó exposiciones en los siguientes congresos:

1. Exposición del trabajo “PROPUESTA PARA EL USO DE TDICS EN COMUNIDADES EDUCATIVAS RURALES. UNA EXPERIENCIA EN ESCUELAS ALBERGUE” [3], presentado en "Congresso Brasileiro de Informática na Educação ". Recife-PE, Brasil. Noviembre de 2017.
2. Exposición del trabajo “MINI SISTEMAS FOTOVOLTAICOS PARA EL USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ZONAS RURALES: OPTIMIZACIÓN DE LA POTENCIA ENTREGADA Y CONSUMIDA”[4], presentado en el “VI Congreso Brasileiro de Energía Solar”, CBENS 2016. Belo Horizonte, Brasil. Abril de 2016.
3. Exposición del trabajo “CARGADORES SOLARES PORTÁTILES PARA EL USO DE DISPOSITIVOS MÓVILES EN ZONAS RURALES AISLADAS DEL NOA” [5], presentado ASADES 2015. San Rafael -Mendoza, Argentina. Noviembre de 2015.

## **1.7 Estructura de la tesis**

El resto de la tesis está organizada de la siguiente manera:

En el segundo capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los conceptos más relevantes relacionados con energía eléctrica y energía solar fotovoltaica. Además, se describen las herramientas que se utilizan en la actualidad para efectuar las mediciones de consumo de energía y rendimiento en los dispositivos móviles.

En el capítulo tres se describen los métodos, técnicas y procedimientos que fueron empleados para el logro de los objetivos propuestos. Además, se resumen las actividades de investigación desarrolladas.

En el capítulo cuatro se describe la técnica utilizada para caracterizar el consumo energético y se estudian mecanismos para reducir el consumo energético en los dispositivos móviles y en las comunicaciones. También se presenta un procedimiento para reducir el consumo en las aplicaciones móviles de uso frecuente en zonas rurales y se exponen estrategias para el despliegue de redes móviles en zonas remotas, haciendo uso de tecnologías de comunicación de bajo consumo energético. En cada caso se analiza el impacto en el consumo energético y en el rendimiento de los dispositivos móviles.

En el quinto capítulo se presenta un modelo para estimar la energía requerida para ejecutar tareas de uso frecuente en zonas rurales aisladas, el modelo incorpora variables asociadas a características propias de estas zonas y sus pobladores. Además, se desarrolla un modelo de energía disponible en función de la radiación solar de la zona, características técnicas de los paneles solares utilizados y potencia que estos entregan.

En el capítulo seis se realiza un estudio de diferentes configuraciones de celdas solares, con la finalidad de optimizar la tensión y la corriente entregada por un panel solar a los requerimientos energéticos de un dispositivo móvil. Además, se presenta la aplicación móvil GiRaSol que implementa los modelos desarrollados (en el capítulo cuatro) para estimar la energía que un panel solar puede entregar en una zona aislada. Utilizando estas estimaciones, la aplicación permite planificar la ejecución de tareas en el dispositivo en función de la energía disponible. También se describe sintéticamente el funcionamiento de un prototipo desarrollado para facilitar la adquisición de los parámetros eléctricos de la

zona, los datos relevados por el prototipo son leídos por GiRaSol y utilizados para implementar el modelo de energía disponible.

En el capítulo siete se aplica la investigación realizada para desarrollar un caso de estudio: “Enseñanza mediada por TIC en una escuela rural aislada de la provincia de Salta”. Se implementó un escenario de trabajo que posibilitó a maestros y alumnos el acceso a Internet mediante el uso de celulares y tecnologías de comunicación de bajo consumo energético, utilizando pico sistemas fotovoltaicos para abastecer de energía a los dispositivos móviles. Los requerimientos energéticos mínimos se determinaron utilizando la aplicación móvil GiRaSol y la energía disponible en la zona se estimó utilizando el prototipo de adquisición de datos. Al final del capítulo se exponen los resultados conseguidos.

En el octavo capítulo se presentan las conclusiones de la tesis y se realiza una discusión sobre las problemáticas de las regiones aisladas y las principales aportaciones de la investigación realizada.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1 Conceptos eléctricos

En este apartado se efectúa una breve introducción de las unidades de medida que son utilizadas por las aplicaciones de medición para mostrar los resultados.

Para el Sistema Internacional de Magnitudes (ISO/IEC 80000):

- La energía se mide en "Joule" (J)
- La potencia se mide en "Watt" (W).
- El tiempo se mide en "segundos" (s).
- La carga eléctrica de una batería se mide en culombios (C) o amperios hora (Ah), donde  $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C}$ .

El Joule es watt por unidad de tiempo. NO es lo mismo decir Joule que Watt, SI es lo mismo Joule que "Watt por segundo". Algunos ejemplos de esta relación:

- $1 \text{ joule [J]} = 1 \text{ Watt por segundo [Ws]}$
- $1 \text{ milijoule [mJ]} = 1 \times 10^{-3} \text{ [J]} = 1 \times 10^{-3} \text{ Watt por segundo [Ws]} = 1 \text{ miliwatt por segundo (mWs)}$
- $1 \text{ microjoule } [\mu\text{J}] = 1 \times 10^{-6} \text{ [J]} = 1 \times 10^{-6} \text{ Watt por segundo [Ws]} = 1 \text{ microwatt por segundo } (\mu\text{Ws})$

El amperio-hora representa la cantidad de electricidad que, en una hora, circula por un conductor una corriente continua de 1 A ( $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ Culombios}$ ). Se emplea para evaluar la capacidad de una batería, es decir la cantidad de electricidad que puede almacenar durante la carga y devolver durante la descarga.

Cuando se trata de corriente continua (CC) la potencia eléctrica (P) desarrollada en un cierto instante por un dispositivo es proporcional a la corriente y a la tensión:

$$P = I \times V$$

Donde I es el valor instantáneo de la intensidad de corriente (amperios), V es el valor instantáneo de la tensión eléctrica o voltaje (voltios) y P la potencia (watts).

#### 2.1.1 Potencia y Energía

Algunos autores presentan los resultados en función de la energía consumida (Joule) y otros en función de la potencia utilizada (Watt). Para una correcta interpretación de los datos es muy importante entender la diferencia entre los conceptos de Potencia y Energía.

La potencia es la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo, indica qué tan rápido se está transfiriendo la energía.



En [6] la potencia y la energía se definen en función del trabajo que el dispositivo móvil realiza:

- Potencia = Carga de trabajo/Tiempo (Watts)
- Energía = Potencia \* Tiempo (Joules) => Potencia= Energía/Tiempo (Joules/s)

La potencia (P) utilizada por un dispositivo móvil es la energía (E) consumida por unidad de tiempo (t).  $P = E/t$ , en unidades Watt (W)=Joule (J)/s o J=Ws.

Mientras que la energía (E) es la integral de la potencia (P) en función del tiempo (Figura 2-1).

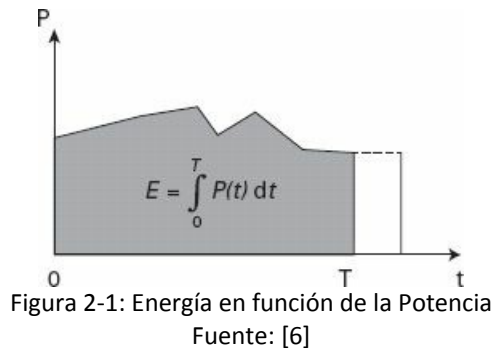


Figura 2-1: Energía en función de la Potencia  
Fuente: [6]

Por ende, la energía es  $E=P.t$  en unidades  $J=W.s$ , por esta razón muchas veces el consumo de energía se mide en kWh (kilo Watt hora) o mWs (mili Watt segundo).

Existen dos formas de consumo de energía: dinámica y estática. El consumo dinámico surge de la actividad de los circuitos, mientras que el consumo estático se produce durante el estado de actividad pasiva de los circuitos.

A modo de ejemplo, un dispositivo móvil de gama media (Samsung Galaxy J2) consume aproximadamente 90 mW en estado ocioso (o estático) y puede llegar a 210 mW en estado activo (o dinámico). En momentos de baja utilización del celular, el consumo dinámico disminuye pero el estático se mantiene, es decir, la proporción del consumo estático respecto al dinámico aumenta considerablemente. Debido a que el número de operaciones realizadas por unidad de energía es menor, la eficiencia energética disminuye. Por lo tanto, los períodos de uso ineficiente de recursos deben ser minimizados para evitar el alto costo de mantener en funcionamiento (consumo estático) un dispositivo del cual se utiliza solo una pequeña porción.

En algunos casos minimizar la potencia también minimiza la energía. Sin embargo, esto no siempre es así, algunas tareas requieren menos energía para completarse cuando se ejecutan a alta velocidad y elevada potencia, debido a que finalizan su ejecución en un periodo de tiempo corto. Si estas tareas se ejecutan a baja velocidad y utilizando menor potencia, finalizarán en un período de tiempo más largo, lo que implica un mayor consumo de energía.

Por lo tanto, cuando se habla de la conservación de la energía, es necesario distinguir entre la reducción de potencia y la reducción de la energía:

## “Reducción de la potencia” $\neq$ “Reducción de la Energía”

En la Figura 2-2 se presentan dos sencillos ejemplos para demostrar este hecho:

### - Ejemplo1:

Potencia estática despreciable (*Negligible*) y voltaje constante

Si se ejecuta una tarea a una frecuencia  $F_1$  y a una potencia  $P_1$ , el consumo de energía  $E_1$  será de 2 unidades.

Si la frecuencia  $F_2$  se reduce a la mitad, la potencia  $P_2$  se reducirá a la mitad y se necesitará el doble de tiempo para ejecutar la tarea. El consumo de energía  $E_2$  será de dos unidades ( $E_1=E_2$ ).

### - Ejemplo2:

Potencia estática significativa (*Significant*) y voltaje constante.

Si ejecutamos una tarea a una frecuencia  $F_1$  y a una potencia  $P_1$  (activa + estática), el consumo de energía  $E_1$  será de 3 unidades.

Si la frecuencia  $F_2$  se reduce a la mitad, la potencia  $P_2$  también se reducirá, pero no a la mitad. El consumo de energía  $E_2$  para completar la tarea será de 4 unidades ( $E_1 < E_2$ ).

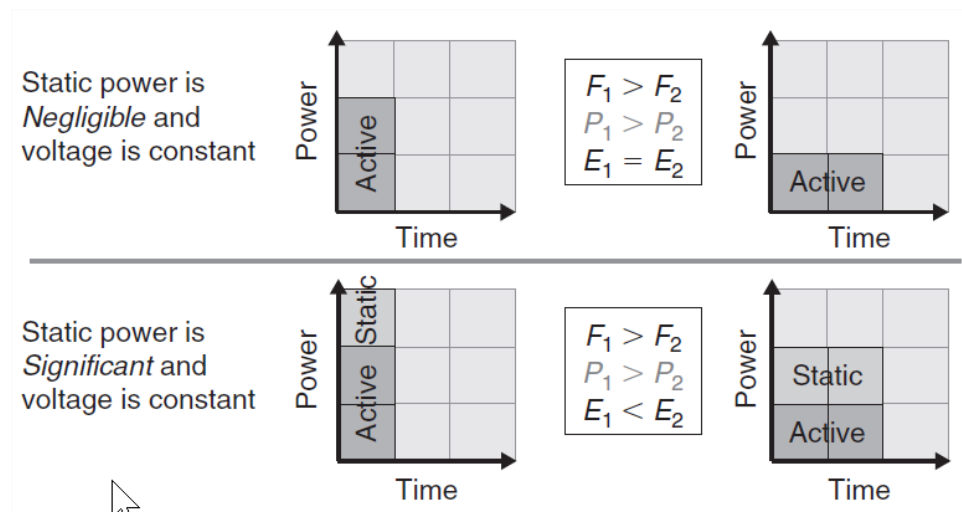


Figura 2-2: Potencia vs Energía

Fuente: Power Management in Mobile Devices [7]

Reducir el consumo de potencia es importante para:

- El diseño de la fuente de alimentación.
- El diseño de los reguladores de voltaje.
- El dimensionamiento de la interconexión de circuitos.
- Enfriamiento a corto plazo.

Reducir el consumo de energía es importante debido a:

- Introduce una mejora en el tiempo de vida de los componentes (que funcionan a menor temperatura, enfriamiento a largo plazo).

- Elevados costos de la energía, que se pueden disminuir haciendo uso de energías renovables.
- Disponibilidad de energía restringida en sistemas móviles (baterías de capacidad limitada).
- Posibilidades de recarga limitadas en zonas rurales aisladas.

### 2.1.2 Eficiencia energética

La eficiencia energética es una práctica que tiene como objeto reducir el consumo de energía para realizar un cierto trabajo.

A modo de ejemplo, en la Figura 2-3 se ilustra un ejemplo de eficiencia energética, se seleccionan tres navegadores para realizar la misma tarea (descarga de contenidos WEB), a continuación se determina la energía que consume cada navegador para realizar la descarga. Se observa que Chrome es el navegador más eficiente desde el punto de vista energético (1549 mWh), esto no significa que presente el mejor rendimiento.

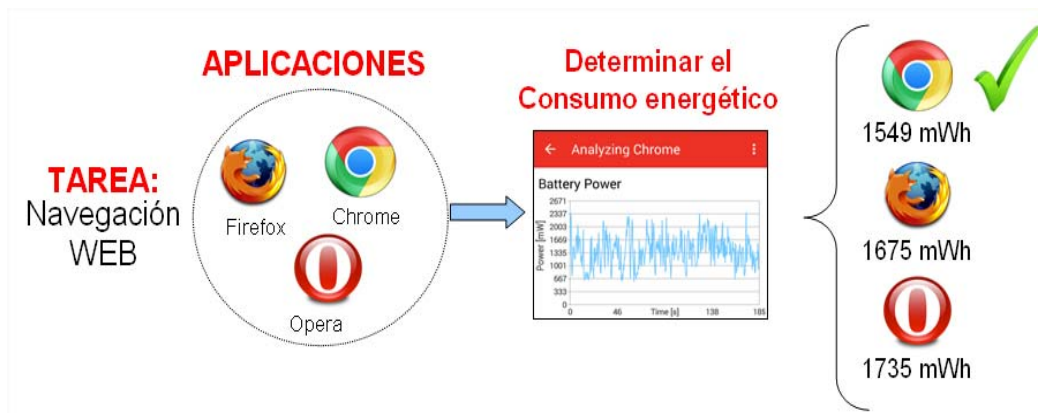


Figura 2-3: Eficiencia energética en aplicaciones móviles

### 2.1.3 Consumo energético y rendimiento

En la actualidad, los dispositivos móviles ofrecen un gran rendimiento, impensado hasta hace pocos años, pero consumen una gran cantidad de energía, recurso escaso en zonas aisladas. Los fabricantes de dispositivos móviles centran sus esfuerzos en reducir el consumo energético sin afectar el rendimiento. La tecnología de escalado dinámico de tensión (Dynamic Voltage Scaling, DVS) intenta solucionar este problema mediante cambios dinámicos de la frecuencia de reloj de la CPU. Las frecuencias más bajas requieren menos potencia, que lleva a una reducción del calor generado, e indirectamente a un aumento del tiempo medio entre fallos de los componentes de un dispositivo, menos energía necesaria para la refrigeración, y la posibilidad de aumentar la densidad de componentes.

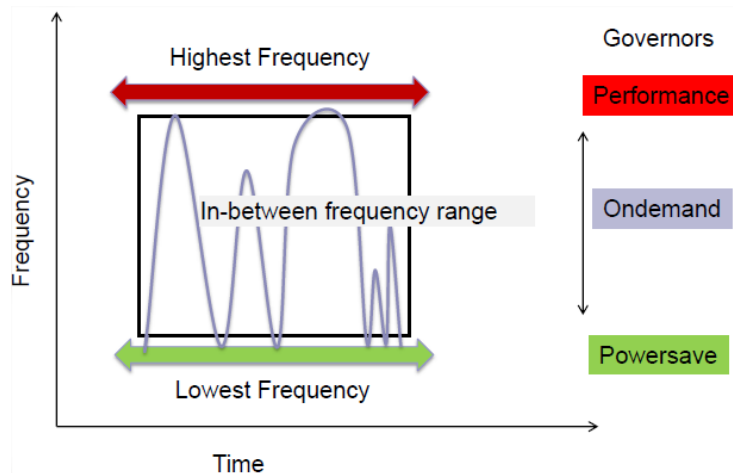


Figura 2-4: Android Frequency Governors

Fuente: [8]

Es normal encontrar sistemas de DVS de tiempo de ejecución en dispositivos móviles como celulares, tabletas y computadoras portátiles. Estos sistemas implementan diferentes políticas seleccionables por el usuario, denominadas Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) Governors [8]. Por ejemplo, la política On-demand (Figura 2-4) ahorra energía disminuyendo la frecuencia cuando el uso de la CPU está por debajo de cierto límite; cuando el uso de la CPU supera ese límite, se aumenta la frecuencia para mejorar el rendimiento.

## 2.2 Baterías

Una batería o acumulador eléctrico, es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas (aunque también pueden ser de otro tipo) que pueden convertir la energía química almacenada en corriente eléctrica. Cada celda consta de un electrodo positivo, o ánodo, un electrodo negativo, o cátodo, y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, permitiendo que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función, alimentar un circuito eléctrico [9]. Al cerrar el circuito -se enciende el dispositivo móvil, por ejemplo- los electrones viajan desde el ánodo al cátodo suministrando energía al teléfono (Figura 2-5), cuando los electrones “terminan” su recorrido del ánodo al cátodo, la batería se agota.

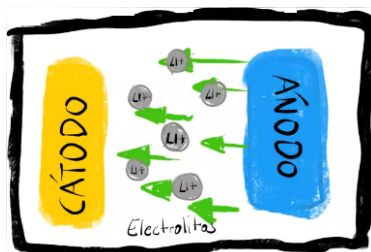


Figura 2-5: Batería alimentando un circuito

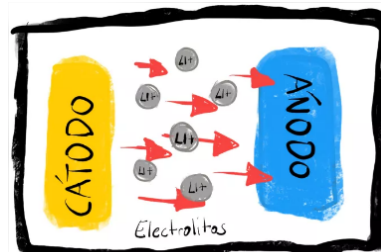


Figura 2-6: Recarga de una batería

Por otro lado, cuando ponemos a cargar un dispositivo, el proceso ocurre a la inversa; los electrones viajan del cátodo al ánodo, reiniciando la carga de la batería (Figura 2-6).

Ambos electrodos están a un extremo por un buen motivo: si bien los electrones navegan de un polo a otro para generar energía, ambos polos no deberían tocarse jamás porque puede ocurrir un corto circuito, al unir el polo negativo con el positivo.

Esto puede ocurrir ciertas veces con baterías de mala calidad, donde no se lleva un apropiado control de seguridad a la hora de fabricación, o puede ser producido por un error de fabricación, como ocurrió con el Samsung Note 7<sup>1</sup>. El problema es que este tipo de errores puede ocasionar que una batería explote en cualquier momento, no sólo cuando está siendo cargada, debido a que se trata, esencialmente, de un corto circuito.

Esta no es la única manera en la que las baterías pueden estallar. Otra falla común, sobre todo con baterías de “terceros” que no pasan rigurosas pruebas de seguridad, es la sobrecarga. La misma ocurre cuando demasiada carga llega al ánodo, rebasando la capacidad de la batería. Este problema no es muy común en las baterías de buena calidad, ya que incorporan sensores y circuitos que monitorean el estado de la batería y cuando llegan a su capacidad límite detienen automáticamente la carga para prevenir la sobrecarga energética. Si se trata de una batería de mala calidad, no hay ninguna seguridad de que los circuitos internos puedan evitar la sobrecarga.

### **2.2.1 Tipos de batería**

Si bien existen baterías ácido plomo y de níquel (Ni-Fe, Ni-Cd y Ni-Mh), en la actualidad la mayoría de los dispositivos móviles utilizan baterías de litio. Basado en la composición de iones de litio que transportan los materiales electrolíticos. Las baterías de litio se pueden clasificar en iones de litio (Li-Ion) y polímeros de litio (LiPo).

A continuación, se resumen las principales diferencias entre baterías de Iones de Litio (Li-Ion) y Polímero de Litio (LiPo):

- Las baterías de iones de litio usan electrolitos líquidos, mientras que en las baterías de LiPo la sal de Litio está contenida en un gel (compuesto polimérico) que sustituye a los electrolitos líquidos.
- Las baterías de iones de litio son relativamente más baratas debido a la mayor densidad de energía (acumulan mayor carga por unidad de peso y volumen)
- Las baterías LiPo son más seguras y ligeras.
- Las baterías LiPo son recargables y tienen una vida útil más larga una vez cargadas, en comparación con las baterías de ion-litio, que tienden a perder carga incluso cuando no están en uso.
- Las LiPo suelen ser más flexibles. Es decir se curvan más fácilmente para adaptarlas a diseños curvos y son más resistentes a esfuerzos de deformación.
- Las LiPo son más caras que las de Li-ion.
- Las baterías de LiPo son más inflamables que las de Li-Ion

### **2.2.2 Ciclo de carga de una batería**

Las baterías de iones de litio que se usan en los teléfonos móviles y otros aparatos electrónicos no se cargan de forma lineal, sino que el ciclo de carga se divide en dos fases distintas (ver Figura 2-7):

---

<sup>1</sup> <https://www.bbc.com/news/business-38714461>

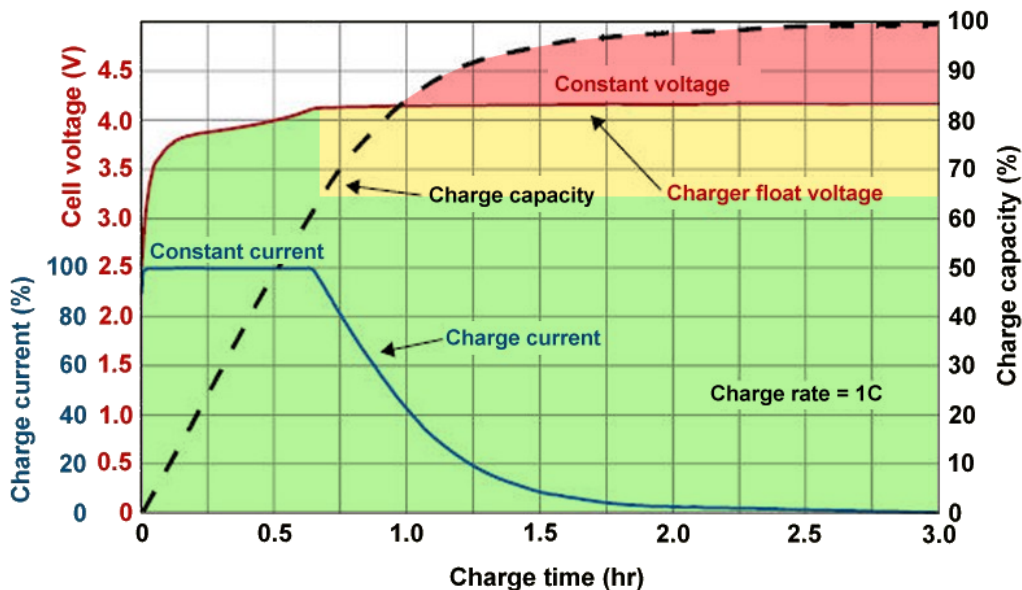


Figura 2-7 : Ciclo de carga de una batería de iones de litio  
Fuente: [10]

1. Al principio la batería va recuperando el voltaje o tensión de funcionamiento. La carga aumenta constantemente desde unos 2 V (cuando la batería está descargada) hasta los 4,2 V que se alcanzan a un 50% de carga aproximadamente. Esos 4,2 V se mantendrán constantes hasta alcanzar el 100% de carga. Estos valores son aproximados y dependen de cada batería en particular. Durante este periodo es cuando la intensidad (amperios) de carga puede ser máxima.
2. Cuando el voltaje se vuelve constante, la corriente empieza a decaer y, por lo tanto, se cargan más lentamente. Por eso, las cargas rápidas son realmente eficaces para cargar el teléfono hasta el 50 o 60% de carga, luego van considerablemente más despacio.

Las tecnologías de carga rápida aprovechan, sobre todo, la primera fase, la de corriente constante en la que se puede aumentar la intensidad antes de que la batería alcance el voltaje máximo.

Por lo tanto, las tecnologías de carga rápida son más efectivas cuando la batería está por debajo del 50 por ciento, pero tienen poco o ningún efecto cuando se supera el 80 por ciento.

La fase de carga a corriente constante es el período menos perjudicial para el estado de la batería a largo plazo. Es mucho más crítica la fase a voltaje máximo, que junto con el calor pueden afectar de manera perjudicial a la vida útil de la batería.

### 2.2.3 Energía acumulada en las baterías

La unidad para medir la energía acumulada en una batería es el joule; sin embargo, para fines prácticos, y dado que el voltaje de una batería es relativamente fijo, se utiliza el Ah como unidad de carga, haciendo referencia al tiempo de carga y descarga de la batería. La equivalencia de energía máxima que se acumula en una batería viene dada por la cantidad de Ah de la batería, multiplicada por 3600 y por el voltaje.

En las baterías de dispositivos móviles es normal el uso del miliamperio hora (mAh), que representa la milésima parte del Ah, o lo que es lo mismo 3,6 C. Esto indica la máxima carga eléctrica que es capaz de almacenar la batería. A mayor carga eléctrica almacenada, mayor tiempo tardará en descargarse.

Ejemplo1:

Si una batería de un teléfono móvil tiene 1390 mAh (1,390 Ah) de capacidad de carga, y proporciona un voltaje de 3,7 V, eso quiere decir que puede acumular 18514,8 joules:

$$1,390 \text{ Ah} \times 3600 \times 3,7\text{v} = 18514,8 \text{ J}$$

Con esta energía acumulada, un celular que consuma en promedio 500mJ (o 500mWs) podrá permanecer funcionando durante 10,28 horas:

$$500 \text{ mJ} = 500 \times 10^{-3} \text{ J} = 0,5\text{J}$$

$$18514,8\text{J}/0,5\text{J} = 37029,6 \text{ s} / 3600 = 10,28 \text{ horas}$$

Ejemplo2:

Con la batería al máximo de su capacidad de carga ¿Cuántas horas podrá permanecer funcionando ese dispositivo si se ejecutan las aplicaciones Chrome, Whatsapp y My Track?

En primer lugar se debe establecer cuánta energía consume el celular sin ejecutar aplicaciones, utilizaremos el valor del ejemplo anterior (500 mJ)

A continuación determinar el consumo energético de las aplicaciones, supongamos los siguiente consumos para este ejemplo: Chrome 1549 mWs, Whatsapp 1612 mWs y My Track 2350 mWs

Finalmente calculamos la cantidad de horas en función del consumo total del celular:

Consumo del celular (sin ejecutar aplicaciones)= 500

Consumo de las aplicaciones =1549+1612+2350 = 5511

Consumo total = 5511 + 500 = 6011 mWs = 6011 mJ = 6,011 J

Tiempo de uso = 18514,8 J/6,011 J = 3080.15 segundos /3600 = 0,8 horas

Debido a que una batería almacena una cantidad determinada de energía, el objetivo principal de la gestión de la energía es reducir al mínimo la cantidad de energía necesaria para la ejecución de las aplicaciones en el dispositivo móvil.

## 2.2.4 Tiempo de carga

El tiempo de carga para baterías se calcula como:

- Tiempo de carga (en horas)=((Capacidad de la batería (mAh)/Intensidad de carga del cargador (mA))xConstante(C)

Esto significa que al dividir los miliamperios (mAh miliamperios hora) de la Batería entre los miliamperios (mA) que entrega el Cargador, obtendremos el tiempo en horas de carga.

La constante (C) es un valor que se aplica por las pérdidas generadas por temperatura y/o conductividad. En las nuevas baterías de Litio y utilizando cargadores certificados por el fabricante, lo normal es aplicar  $C=1$ .

Ejemplo:

Una batería de un teléfono móvil de 3600 mAh y un voltaje de 3,7 V. ¿Cuál será el tiempo de carga, si realizamos la recarga desde un puerto USB 3.0 con una intensidad de carga de 900 mA?

$$\text{Tiempo de carga} = 3600 \text{ mAh} / 900 \text{ mA} = 4 \text{ horas}$$

Esto siempre y cuando el dispositivo se encuentre apagado y no consuma energía durante la recarga.

La corriente que entrega el cargador puede variar durante el proceso de carga (Figura 2-7), razón por la cual el tiempo de carga calculado es aproximado.

### **2.2.5 Tiempo de descarga**

El tiempo de descarga se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Tiempo de descarga} = \text{carga eléctrica de la batería} / \text{consumo eléctrico}$$

Ejemplo:

Si una batería de 3,7 voltios puede cargar 1000 mAh, durará 50 horas en un dispositivo que consuma 200 mA por hora:

$$\text{Tiempo de descarga} = \text{carga eléctrica} / \text{consumo eléctrico}$$

$$\text{Tiempo de descarga} = 1000 / 200 = 50 \text{ horas}$$

Y si el dispositivo móvil consume 10 mA por hora, el tiempo de vida de la batería será de 10 horas.

### **2.2.6 Consumo eléctrico**

El consumo eléctrico de un dispositivo se puede obtener aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo eléctrico} = \text{carga eléctrica de la batería} / \text{tiempo de descarga}$$

Ejemplo:

Si un dispositivo móvil con una batería de 800 mAh tarda 400 horas en descargarse, el consumo del dispositivo es de 2 mA:

$$\text{Consumo} = \text{carga eléctrica} / \text{tiempo de descarga} = 800 / 400 = 2 \text{ mA}$$

Y si  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ , entonces  $2 \text{ mA} = 0,002 \text{ A} = 0,002 \text{ C/s}$ .

### **2.2.7 Buenas prácticas para el uso de baterías**

A continuación, se resumen las principales recomendaciones para el uso correcto de las baterías de dispositivos móviles (de [10] y [11]).



#### Recomendaciones para la carga:

- Apague el dispositivo durante la carga, realizar una carga mientras se consume energía almacenada en la batería puede ocasionar un mal funcionamiento del cargador.
- Nunca cargar a temperatura de congelación[10], realizar la carga a temperaturas moderada (0°C a 45°C). Para mejores resultados, realizar la carga entre 10°C y 30°C
- Se debe bajar la corriente de carga (amperaje) cuando la temperatura sea baja.
- La carga a temperaturas bajas (o altas) requiere un ajuste del límite de voltaje.

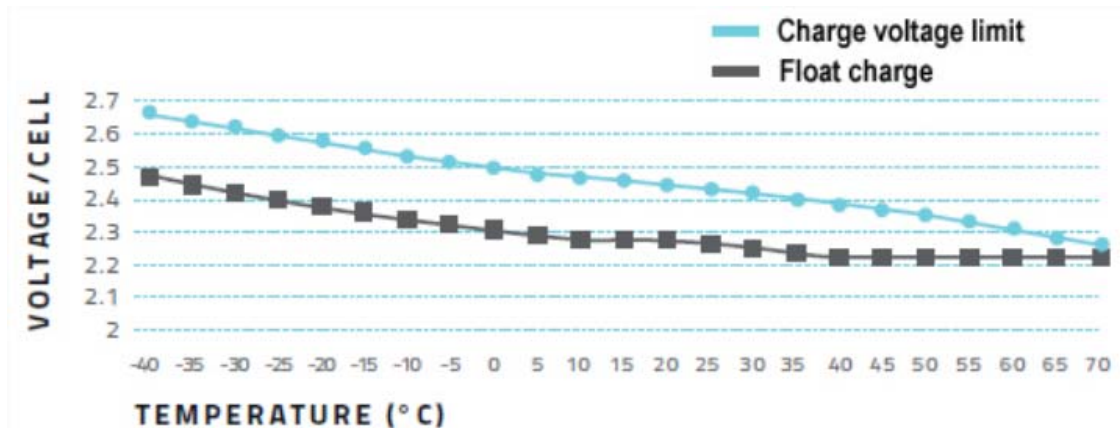


Figura 2-8: Voltajes de carga a diferentes temperaturas.

Fuente: [11]

- Las baterías de Litio no necesitan una carga completa; es mejor una carga parcial. Para mejorar su tiempo de vida se recomienda utilizarlas con una carga entre el 15 y 80 por ciento.
- Se debe evitar mantenerlas con carga completa durante largos períodos.
- La primera carga no es decisiva en cuanto a su duración ni es preciso hacerla; el funcionamiento de una batería de litio en la primera carga es igual al de las siguientes.
- Superar el voltaje máximo que soportan las celdas acorta el tiempo de vida de la batería. Las baterías de Litio no pueden absorber la sobrecarga. Cuando está completamente cargada, la corriente de carga debe cortarse. Para minimizar el estrés, se debe minimizar el tiempo en el punto máximo de carga de la batería
- Para recargar no es imprescindible usar un cargador específico para la marca y modelo del dispositivo (a pesar de ser lo ideal, es costoso). Se puede emplear cualquier cargador de buena calidad y que cumpla con las características eléctricas del dispositivo.
- No todos los cargadores posibilitan una carga máxima completa, es posible que la batería no esté completamente cargada cuando el indicador de carga indique un 100% de carga.
- La mayoría de los dispositivos actuales tiene un comportamiento inteligente. “Negocian” el voltaje y el amperaje que puede recibir la batería desde el cargador. Además, pueden detectar cuándo se completó la carga de sus baterías para desconectarlas automáticamente y desviar la corriente al resto del dispositivo.
- Desconectar el cargador si la batería se calienta excesivamente

#### Recomendaciones para la descarga:

- Las temperaturas de descarga permitidas pueden variar en el siguiente rango: -20°C a 60°C.

- No dejar descargar la totalidad de la batería periódicamente. Al contrario, puede perjudicar la eficacia. Lo mejor es evitar que la carga baje más allá de un 15%.
- La descarga de la batería puede variar si se utiliza a diferentes temperaturas. Para ejemplificar esto, en el gráfico de la Figura 2-9 se presentan las curvas de descarga de baterías LiPo.

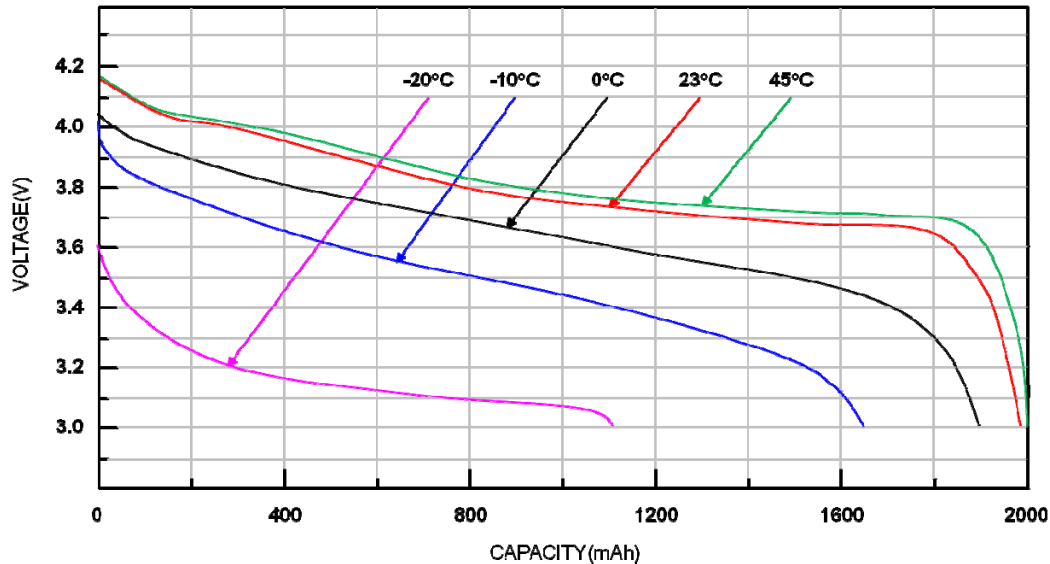


Figura 2-9: Curva de descarga de baterías LiPo en función de la temperatura  
Fuente: [10]

Recomendaciones para el almacenamiento:

- Se recomienda cargar las baterías de litio a un 40% antes de almacenarlas por largos periodos. No es bueno para la batería cargarla por completo y después almacenarla, dado que esto reducirá su vida útil.
- Es recomendable que permanezcan en un sitio fresco (15 °C) y evitar el calor. Son muy sensibles a la temperatura; dejarlas al sol y/o en lugares húmedos disminuye su rendimiento.
- Las baterías de litio son muy delicadas. Por lo que, de ser posible, utilizar bolsas ignífugas para almacenarlas.

## 2.3 Tecnologías de Carga

### 2.3.1 Carga USB

Tradicionalmente, convivieron tres tipos de puertos USB: los estándares, los dedicados y los de transmisión de datos.

- Standard Downstream Port (SDP): transmiten datos y suministran entre 500mA y 800 mA. Son los puertos tradicionales que pueden encontrar en televisores, tomas para pendrive o en las computadoras de hace unos años.
- Charging Downstream Port (CDP): transmiten datos y suministran hasta 1.5A.

- Dedicated Charging Port (DCP): no transmiten datos y sólo sirven para cargar. En general, ofrecen corrientes de 1.5A o superiores. En esta categoría se encuentran los típicos cargadores de pared de 5V/1.5A.

### 2.3.2 Carga rápida

La autonomía de la batería es uno de los principales factores que tienen en cuenta los usuarios a la hora de elegir un Smartphone. Por este motivo, los fabricantes intentan equipar en sus modelos baterías de mayor capacidad, algo que no está exento de problemas, ya que incrementa el tiempo que el terminal tiene que estar cargando, lo que les obliga a innovar en la tecnología de carga.

El sistema de carga rápida que ofrece mayor potencia en la actualidad es el Super VOOC de OPPO (50W) [12], seguido por SuperCharge de Huawei (40W) y QuickCharge 5.0 de Qualcomm (32W). En la Tabla 2-1 se resumen los principales sistemas de carga ordenados por la potencia que entregan (de mayor a menor).

| TECNOLOGÍA                       | Especificaciones  | Potencia  |
|----------------------------------|---|-----------|
| OPPO SUPERVOOC FLASH CHARGE      | 10V, 5A   | 50W       |
| HUAWEI SUPERCHARGE               | 5V 4,5A<br>4,5V 5A<br>8V x 5A                                       | 40W Máx.  |
| QUALCOMM QUICKCHARGE 4.0 y 4.0+  | 5V 2A<br>9V 2A<br>12V 1,67A<br>5/9V 3A USB-PD                       | 27W Máx.  |
| MOTOROLA TURBO POWER             | 9V x 1,67A<br>12V x 1,2A<br>5V x 2,85A<br>9V x 2,85A<br>12V x 2.15A | 25W Máx.  |
| MEDIATEK PUMPEXPRESS 3.0         | 5V 2A<br>9V 2A<br>12V 2A  | 24W Máx.  |
| OPPO VOOC CHARGE                 | 5V 4A   | 20W       |
| ONEPLUS DASH CHARGE              | 5V 4A   | 20W       |
| QUALCOMM QUICKCHARGE 3.0         | 5V 2A<br>9V 2A<br>12V 1,67A   | 18W Máx.  |
| QUALCOMM QUICKCHARGE 2.0         | 5V 2A<br>9V 2A<br>12V 1,67A   | 18W Máx.  |
| SAMSUNG ADAPTATIVE FAST CHARGING | 5V 2A<br>9V 1,67A   | 15W Máx.  |
| QUALCOMM QUICK CHARGE            | 5V 2A   | 10W       |
| USB 3.0                          | 5V x 0,5A<br>5V x 0,9A  | 4,5W Máx. |

Tabla 2-1: Tecnologías de carga rápida en el mercado  
Fuente: [13]

### 2.3.3 Quick Charge de Qualcomm

Quick Charge, la carga rápida de Qualcomm, es uno de los sistemas de carga rápida más extendidos [14]. Esta tecnología funciona en los smartphones y otros dispositivos inteligentes con procesadores Snapdragon 845, 835, 820, 620, 618, 617 o 430, entre otros, aunque cualquier fabricante puede utilizar (previo licenciamiento) este estándar para integrarlo en sus dispositivos.

Se desarrollaron varias versiones de la tecnología Quick Charge. La más reciente es Quick Charge 4, presentada en junio de 2017, pero también están Quick Charge 3.0, Quick Charge 2.0 y Quick Charge 1.0. En la Tabla 2-2 se indica la potencia de carga para cada versión.

| Versión             | Voltaje  | Corriente                            | Máx. potencia                |
|---------------------|--|--------------------------------------|------------------------------|
| Quick Charge 1.0    | 5 V  | 2 A                                  | 10 W                         |
| Quick Charge 2.0    | 5 V / 9 V / 12 V                               | 1.67 A / 2 A                         | 18 W                         |
| Quick Charge 3.0    | 3.6 V - 20 V<br>(incrementos de 200 mV)        | 2.5 A / 4.6 A                        | 18 W                         |
| Quick Charge 4 y 4+ | 5V/9V<br>3.6 V - 20V<br>(incrementos de 20 mV) | 2.5 A / 4.6 A QC Mode<br>3 A, USB-PD | 18W QC Mode<br>27 W (USB-PD) |

Tabla 2-2: Versiones de la tecnología Quick Charge

Fuente: [14]

#### Quick Charge 1.0

Antes que llegaran los sistemas de carga rápida, los cargadores DCP eran los que proporcionaban más potencia. Precisamente, la tecnología Quick Charge 1.0 nació para aprovechar al máximo la capacidad de los cargadores DCP que podían ofrecer 2A o más, ya que el estándar USB requería un máximo de 1.5A.

#### Quick Charge 2.0

Durante un tiempo, la potencia de los cargadores DCP fue suficiente para las baterías de litio de la época, esto cambió cuando evolucionaron a las del tipo LiPo (Li-Ion Po): las nuevas baterías aumentaban la densidad energética y el rendimiento y permitían mayores corrientes de carga y descarga. La carga ya no estaba limitada por la batería sino por el sistema de carga. En este contexto nace Quick Charge 2.0, que se caracterizó por traer tres novedades a dispositivos y cargadores:

- Soluciona un fenómeno hasta entonces inevitable: cuando aumenta la corriente de carga entre un cargador y un dispositivo, también lo hacen las pérdidas de transmisión de potencia (en los conectores, el cable y la circuitería intermedia). Para evitarlo, Qualcomm diseñó una tecnología que aumenta la tensión del cargador usando la negociación entre el dispositivo y el cargador. Así, bajando la corriente, pero subiendo la tensión, aumenta la potencia y se reducen las pérdidas.
- Proporciona la carga en 3 modos de funcionamiento: el cargador suministra la carga (hasta 18W) en 5V, 9V o 12V según la potencia que “solicite” el dispositivo.

- Qualcomm comenzó a desarrollar soluciones de hardware y políticas de software que dieran soporte y seguridad durante la carga y funcionamiento del dispositivo.

### Quick Charge 3.0

Los laboratorios de Qualcomm comprobaron que la carga podía ser más eficiente si el voltaje de entrada se iba adaptando a las necesidades de cada momento. La máxima potencia que podía proporcionar Quick Charge 3.0 seguía siendo 18W (la misma que QC2.0), pero permitía al dispositivo “solicitarla” en pasos de 0.2V entre 5V y 12V. En esta versión, Qualcomm adaptó y mejoró las políticas que había diseñado para QC2.0 e incluyó nuevas políticas de protección.

### Quick Charge 4

En paralelo al avance de la tecnología Quick Charge (1.0, 2.0 y 3.0) se desarrolló el conector USB Tipo-C, un nuevo tipo de conector que soporta hasta 100W (Tabla 2-3) superando las limitaciones de potencia de la carga USB con otro tipo de conectores.

| Potencia<br>Voltaje | 0.5 - 15W  | 15 - 27W    | 27 - 45W   | 45 - 60W    | 60 - 100W  |
|---------------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| 5V                  | 0.1 – 3.0A | 3.0A (15W)  | 3.0A (15W) | 3.0A (15W)  | 3.0A (15W) |
| 9V                  |            | 1.67 – 3.0A | 3.0A (27W) | 3.0A (27W)  | 3.0A (27W) |
| 15V                 |            |             | 1.8 – 3.0A | 3.0A (45W)  | 3.0A (45W) |
| 20V                 |            |             |            | 2.25 – 3.0A | 3.0 – 5.0A |

Tabla 2-3: Características eléctricas del conector USB Tipo-C

Para gestionar la energía en el nuevo conector USB Tipo-C, el fórum USB diseñó el protocolo Power Delivery (PD) [15]. La peculiaridad de PD es que, mientras la mayoría de protocolos de carga rápida no son abiertos y son incompatibles entre sí, Power Delivery es un “protocolo de carga rápida estándar” y sirve para todos los dispositivos que usen USB Tipo-C.

Quick Charge 4, además de soportar este nuevo protocolo, incorpora las tecnologías de versiones anteriores y nuevas mejoras para la gestión térmica, la seguridad en la batería y la eficiencia energética.

Un dispositivo móvil que soporta Quick Charge 4 es aquel que cumple los requisitos de software y hardware para ser compatible con una serie de tecnologías relacionadas con la carga rápida, la protección de la batería y la gestión térmica. Si, además de cumplir esos requisitos, el fabricante ha empleado las prácticas recomendadas por Qualcomm durante el desarrollo del dispositivo, recibe la calificación: compatible con Quick Charge 4+.

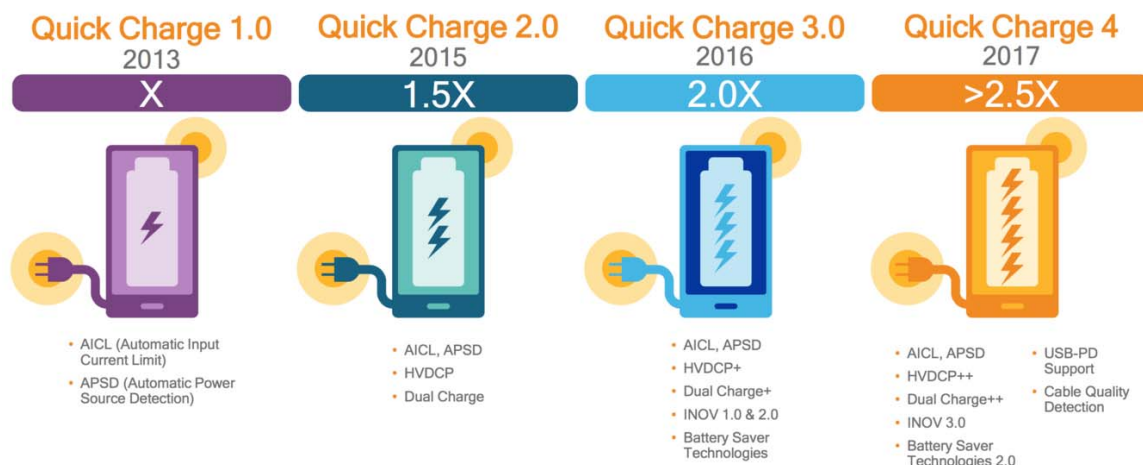


Figura 2-10 : Evolución de la tecnología Quick Charge  
Tomada de [16]

La infografía de la Figura 2-10 muestra la evolución de la tecnología Quick Charge, a continuación se describen las características más importantes [16]:

- **INOV (Intelligent Negotiation for Optimum Voltage)**

Es un algoritmo que gestiona la tensión de carga óptima teniendo en cuenta el cargador y la batería. Simultáneamente, Quick Charge utiliza **AICL** (Automatic Input Current Limit) para gestionar la corriente óptima y **APSD** (Automatic Power Source Detection) para la detección automática de la fuente de alimentación, que ayuda a la batería a identificar el cargador y ajusta, en base a este, el flujo de corriente. Algo de gran ayuda si se utilizan cargadores diferentes.

- **HVDCP (High Voltage Dedicated Charging Port)**

Los cargadores QC incorporan puertos dedicados de alto voltaje que no transmiten datos y sólo sirven para cargar.

- **USB-PD Support**

Es compatible con cargadores USB-PD (Power delivery, hasta 100 W)

- **Battery Saver**

Se trata de una tecnología que regula el rendimiento de la batería a lo largo del tiempo. La protección se implementa en múltiples niveles simultáneamente y durante todo el proceso de carga para ayudar a medir el voltaje, la corriente y la temperatura con precisión, al mismo tiempo que protege la batería, el sistema, los cables y los conectores. Lo cual, prolonga la vida útil de la batería.

El dispositivo y el cargador se reconocen mutuamente cuando están conectados. El dispositivo indica la cantidad exacta de energía que necesita, el cargador la entrega. Durante el proceso de carga, hay comunicación de ida y vuelta para monitorear la cantidad de energía que fluye hacia su dispositivo. El cargador decidirá de forma autónoma la cantidad de energía que entregará a medida que la batería se aproxime a la

carga completa. Esta capa de carga inteligente ayuda a evitar la sobrecarga y regula la corriente en cada ciclo de carga.

El suministro de energía es muy preciso, se ajusta el voltaje para entregar al dispositivo móvil la cantidad de energía que requiere. Con Quick Charge 3.0, la potencia se entrega en incrementos de 200 mV. Con Quick Charge 4, los incrementos se reducen a 20 mV. Esto ayuda a mejorar la eficiencia de carga y disminuye la energía desperdiciada.

- **Dual Charge y Thermal balancing**

Con la carga tradicional, a medida que se carga el dispositivo, la energía fluye a través de una sola ruta de alimentación, lo que puede hacer que el dispositivo reciba menos energía para evitar el exceso de calor, esto alarga el tiempo de carga. Para abordar este problema de gestión térmica, la tecnología Dual Charge los divide en dos rutas autónomas y el balanceo térmico inteligente determina la cantidad de energía que se debe colocar en cada ruta, ajustando dinámicamente el flujo para entregar la cantidad óptima de energía a la batería. Esto permite que la batería del teléfono se cargue a menor temperatura y a un ritmo constante, lo que resulta en una carga más rápida.

El equilibrio térmico inteligente permite que se utilicen niveles de potencia más altos desde una fuente de energía, lo que reduce significativamente el tiempo de carga.

## **2.4 Medición del consumo energético en dispositivos móviles**

En los últimos años se produjo una importante evolución en los dispositivos móviles en general y en los teléfonos celulares en particular. Los nuevos equipos llevan integrados una gran variedad de componentes como CPU, memoria, cámara, acelerómetro, pantalla LCD, GPS, micrófono, altavoces, interfaces de comunicación 2G/3G/4G, Wifi, Bluetooth, etc. Estos celulares se denominan teléfonos inteligentes o smartphones, y brindan a sus usuarios funcionalidades avanzadas, entre otras: navegar por Internet, reproducir audio y video, tomar fotografías, filmar videos y utilizar aplicaciones de posicionamiento satelital.

La velocidad a la que ha evolucionado la capacidad de las baterías no ha sido la misma a la que han evolucionado los teléfonos móviles. La gran mayoría de los smartphones utiliza baterías recargables electroquímicas, normalmente de iones de litio (Li-ion) o de polímeros de litio (Li-po). El problema de estas baterías es su corta duración cuando se utiliza el dispositivo móvil de forma continua por muchas horas, y en especial cuando se mantienen conexiones a Internet a través de la interfaz de radio (2G/3G/4G) o la interfaz Wifi. Este inconveniente ha planteado que los propios fabricantes tengan que diseñar el hardware y el software de los dispositivos con premisas de eficiencia energética para reducir los niveles de energía consumidos por estos equipos. No obstante, si un dispositivo será utilizado en zonas donde las posibilidades de recarga son limitadas (Ej.: Zonas rurales aisladas) será necesario implementar mecanismos que permitan administrar y optimizar el uso de la energía disponible.

### **2.4.1 Terminología básica**

La medición de potencia (*“Power measurement”*) es el acto de obtener valores de consumo de energía (o potencia) utilizando un hardware específico. El ejemplo más común es la

medición de potencia con un instrumento externo, como el Monsoon Power Monitor [17], conectado a la interfaz de la batería de un dispositivo móvil.

Un modelo de potencia (“*Power Model*”) es una representación matemática del consumo de energía en función de las variables que impactan en el mismo. Por lo general, los valores de estas variables se obtienen directamente de las mediciones realizadas en el celular. Un modelo de energía puede caracterizar un solo subsistema (CPU, Video, Wifi, Radio Celular, otros), una combinación de ellos o incluso un celular completo (modelo a nivel de sistema).

La estimación de potencia (“*Power estimation*”) informa el consumo de energía de un dispositivo móvil (o un subsistema) en función del modelo de consumo utilizado. La precisión de la estimación dependerá de la precisión del modelo en uso.

Un perfilador de energía (“*Energy Profiler*”) es un sistema que utiliza modelos de potencia para generar perfiles de consumo de energía en un dispositivo móvil. Por lo tanto, a diferencia de la medición de potencia, un *profiler* proporciona estimaciones de la potencia. Un *profiler* trabaja en diferentes niveles de abstracción (Sistema, aplicación, proceso), mientras que la medición de potencia solo proporciona el consumo de energía del hardware que se mide, en la mayoría de los casos, el consumo completo del celular.

#### **2.4.2 Estado del arte**

Para realizar una administración eficiente de energía se requiere tener un conocimiento previo sobre dónde y cómo se consume la energía. Determinar qué componentes del dispositivo hacen que las baterías se descarguen rápidamente puede ayudar a desarrollar técnicas para reducir el consumo de energía. Sin embargo, obtener el consumo de cada uno de los componentes de un dispositivo móvil no es una tarea fácil de realizar.

Se llevaron a cabo estudios que centran su problemática en analizar el consumo de energía de un dispositivo móvil y proponen modelos matemáticos para estimar este consumo utilizando herramientas de software y/o hardware para medir el consumo de energía de los distintos componentes de hardware.

En [18] se propone “*PowerBooster*”, un modelo de energía para estimar el consumo de energía detallado (Fine-grained) en tiempo real y por aplicación de los siguientes componentes de un smartphone: CPU, LCD, Wifi, Bluetooth, red celular (2G y 3G). A partir de este modelo se desarrolló la aplicación Powertutor para Android, esta aplicación es utilizada por desarrolladores y usuarios para optimizar el consumo de energía de las aplicaciones móviles sin afectar el rendimiento del dispositivo.

En [19] se estudia un escenario real de uso de Smartphone, utilizando Powertutor para realizar las mediciones de consumo energético. Con base en los resultados de Powertutor se propone un Framework para modelar y optimizar el consumo de energía de aplicaciones en dispositivos móviles (Figura 2-11).



|          |  |       |                                  |
|----------|--|-------|----------------------------------|
| Model    | $(\beta_{uh} \times freq_h + \beta_{ul} \times freq_l) \times util + \beta_{CPU} \times CPU\_on + \beta_{br} \times brightness$ $+ \beta_{Gon} \times GPS\_on + \beta_{Gsl} \times GPS\_sl + \beta_{Wi-Fi_l} \times Wi-Fi_l + \beta_{Wi-Fi_h} \times Wi-Fi_h$ $+ \beta_{3G\_idle} \times 3G\_idle + \beta_{3G\_FACH} \times 3G\_FACH + \beta_{3G\_DCH} \times 3G\_DCH$ |       |                                  |
| Category | System variable  | Range | Power coefficient                |
| CPU      | util   | 1-100 | $\beta_{uh}$ : 4.34              |
|          | freq <sub>l</sub> , freq <sub>h</sub>  | 0,1   | $\beta_{ul}$ : 3.42              |
|          | CPU_on   | 0,1   | n.a.                             |
|          | CPU_on   | 0,1   | $\beta_{CPU}$ : 121.46           |
| Wi-Fi    | npackets, R <sub>data</sub>  | 0-∞   | n.a.                             |
|          | R <sub>channel</sub>   | 1-54  | $\beta_{\sigma}$                 |
|          | Wi-Fi <sub>l</sub>   | 0,1   | $\beta_{Wi-Fi_l}$ : 20           |
|          | Wi-Fi <sub>h</sub>   | 0,1   | $\beta_{Wi-Fi_h}$ : Equation 2.2 |
| Audio    | Audio_on   | 0,1   | $\beta_{audio}$ : 384.62         |
| LCD      | brightness   | 0-255 | $\beta_{br}$ : 2.40              |
| GPS      | GPS_on   | 0,1   | $\beta_{Gon}$ : 429.55           |
|          | GPS_sl   | 0,1   | $\beta_{Gsl}$ : 173.55           |
| Cellular | data_rate  | 0-∞   | n.a.                             |
|          | downlink_queue   | 0-∞   | n.a.                             |
|          | uplink_queue   | 0-∞   | n.a.                             |
|          | 3G <sub>idle</sub>   | 0,1   | $\beta_{3G\_idle}$ : 10          |
|          | 3G <sub>FACH</sub>   | 0,1   | $\beta_{3G\_FACH}$ : 401         |
|          | 3G <sub>DCH</sub>  | 0,1   | $\beta_{3G\_DCH}$ : 570          |

Figura 2-11 : Ejemplo de modelo de consumo de energía  
Presentado en [19].

En [20] se presenta una infraestructura para medir (con elevada precisión) la energía que precisa un dispositivo móvil para mostrar páginas web. Con los resultados obtenidos en las mediciones se realizan recomendaciones concretas para diseñar páginas web minimizando la energía necesaria para mostrar las páginas. Las mediciones se realizaron utilizando un sistema que mide directamente la corriente eléctrica que circula hacia el dispositivo, utilizando una combinación de hardware externo (multímetro y batería abierta) y software para automatizar las mediciones (Figura 2-12).

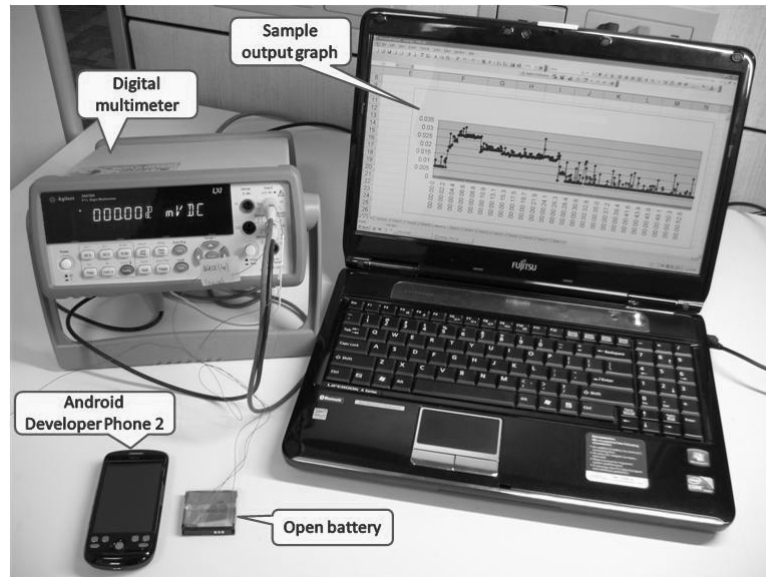


Figura 2-12: Sistema de medición de alta precisión  
Fuente: [20]

En [21] se efectúa un análisis detallado del consumo de energía de un Smartphone Samsung Galaxy SIII, las mediciones de potencia se realizaron utilizando un multímetro digital y conexiones a nivel circuito (Figura 2-13). Se ejecutaron una serie de pruebas de uso cotidiano de un celular, que incluyen: Reproducción de audio y video, juegos, llamadas telefónicas, SMS, envío de correo electrónico, navegación WEB, toma de fotografías y

celular inactivo. Para cada prueba se midió el consumo de energía de los principales componente del Smartphone: CPU, RAM, pantalla, GPU, interfaces inalámbricas, camera, GPS y sensores ambientales,

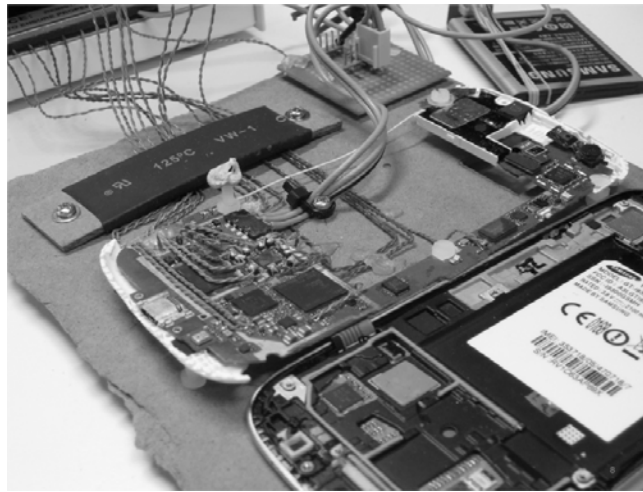


Figura 2-13: Medición del consumo energético a nivel circuito  
Fuente: [21]

En [22] se presenta un estudio comparativo de la eficiencia energética en dispositivos y aplicaciones móviles, se utilizó el programa *Trepn profiler* para medir el rendimiento y el consumo de energía de aplicaciones Android en dispositivos con procesadores Snapdragon desarrollados por la empresa Qualcomm [23]. *Trepn Profiler* posibilita el acceso a la siguiente información: Porcentaje y frecuencia de uso de la CPU, consumo de energía, estadísticas de consumo de memoria física y virtual y utilización de la red celular y Wifi. El consumo de energía se mide a través de sensores (*sensor-based*) incorporados en los procesadores Snapdragon, esto permite realizar mediciones con mayor precisión. Los sensores internos miden el consumo de energía en cada componente del dispositivo y a partir de estos valores obtienen el consumo total de energía.

Otro factor que impacta en el consumo de energía es la cantidad de núcleos (Cores) activos de un dispositivo móvil, en [24] se investiga como la desconexión (apagado) de núcleos puede ser utilizada para reducir el consumo energético.

En [8] se caracteriza el consumo energético de diferentes “*Governors*” de ahorro de energía en un dispositivo móvil basado en Android. Los resultados del trabajo demuestran que los “*governors*” no siempre brindan la mejor eficiencia energética, en especial para cargas de trabajo intensivas de CPU debido al mayor tiempo de ejecución y resaltan la necesidad de caracterizar las cargas de trabajo y ajustar el escalado dinámico de frecuencia DVFS en función de las características de la carga de trabajo.

En [25] se presenta un enfoque para la construcción de modelos de consumo de energía a partir de mediciones de colaboración colectiva (Crowdsourced). Los modelos construidos con este enfoque permiten capturar los efectos combinados de múltiples factores simultáneamente, proporcionando una caracterización del estado de energía en un dispositivo móvil. Para la construcción de los modelos se realiza un análisis a gran escala (alrededor de 150.000 usuarios activos de Android) sobre un conjunto de datos almacenados, utilizando factores de contexto como: Uso de CPU, distancia recorrida, temperatura de la batería, voltaje de la batería, brillo de la pantalla, tipo de red móvil, tipo

de red, intensidad de la señal Wifi, velocidad de la conexión Wifi, estado de los datos móviles, actividad de los datos móviles. La correlación de estos factores proporciona ideas nuevas relacionadas con el consumo de la batería. Por ejemplo, en la Figura 2-14, se observa como varía el tiempo de vida de la batería en función de 4 factores.

| Battery Temperature | Distance Traveled | CPU Use | Screen Brightness | Estimated Battery Life (h) |
|---------------------|-------------------|---------|-------------------|----------------------------|
| Under 30°C          | >0                | Low     | Automatic         | 8.83 – 9.12                |
| Under 30°C          | >0                | Low     | Manual            | 8.49 – 8.82                |
| Under 30°C          | >0                | High    | Automatic         | 8.09 – 8.24                |
| Under 30°C          | >0                | Medium  | Automatic         | 7.65 – 7.89                |
| Under 30°C          | >0                | Medium  | Manual            | 7.34 – 7.60                |
| Under 30°C          | >0                | High    | Manual            | 7.27 – 7.41                |
| Under 30°C          | None              | Medium  | Automatic         | 6.57 – 6.64                |
| Under 30°C          | None              | Low     | Automatic         | 6.28 – 6.35                |
| Under 30°C          | None              | Medium  | Manual            | 6.13 – 6.20                |
| Under 30°C          | None              | Low     | Manual            | 5.88 – 5.96                |
| Under 30°C          | None              | High    | Automatic         | 5.78 – 5.82                |
| Over 30°C           | >0                | Low     | Automatic         | 5.08 – 5.22                |
| Under 30°C          | None              | High    | Manual            | 5.00 – 5.04                |
| Over 30°C           | >0                | Low     | Manual            | 4.73 – 4.88                |
| Over 30°C           | >0                | High    | Automatic         | 4.62 – 4.69                |
| Over 30°C           | >0                | Medium  | Automatic         | 4.59 – 4.70                |
| Over 30°C           | >0                | Medium  | Manual            | 4.28 – 4.39                |
| Over 30°C           | None              | Medium  | Automatic         | 4.25 – 4.29                |
| Over 30°C           | >0                | High    | Manual            | 4.08 – 4.14                |
| Over 30°C           | None              | Medium  | Manual            | 4.06 – 4.09                |
| Over 30°C           | None              | Low     | Automatic         | 4.02 – 4.06                |
| Over 30°C           | None              | High    | Automatic         | 3.91 – 3.94                |
| Over 30°C           | None              | Low     | Manual            | 3.74 – 3.78                |
| Over 30°C           | None              | High    | Manual            | 3.45 – 3.46                |

Figura 2-14: Tiempo de vida de la batería para una combinación de 4 factores de contexto

Fuente: [25]

En [26] se estudia el impacto de ocho “buenas prácticas” de programación utilizadas para reducir el consumo de energía (aware programming). Se presentan los resultados de un estudio experimental realizado sobre seis aplicaciones móviles, en todos los casos se demuestra que la batería del dispositivo móvil puede durar hasta aproximadamente una hora adicional si las aplicaciones son desarrolladas con prácticas de ahorro de energía. Las buenas prácticas abordadas por los autores son las siguientes:

- Minimizar E/S

El acceso a dispositivos externos aumenta el consumo de energía. Esto podría ser aún más perjudicial para los dispositivos móviles, que realizan operaciones de E/S con frecuencia a través de Bluetooth, Wifi, cámara y GPS, en la misma aplicación y concurrentemente.

- Evitar Operaciones masivas

Si se necesita enviar una secuencia de comandos a un dispositivo de hardware, es preferible que se almacenen antes en un buffer y se los envíe todos juntos una sola vez. De esta manera se evitan múltiples ciclos: Wakeup -> Send -> Sleep.

- Evitar operaciones de sondeo (polling)

La aplicación está continuamente ocupada, sondeando el hardware para verificar si el valor deseado está disponible, lo que puede convertirse en una fuente de ciclos de CPU desperdiciados. Una sugerencia común es utilizar comunicación asíncrona, en la cual el destinatario puede permanecer inactivo hasta que ocurra un evento, un enfoque basado en interrupciones puede hacer un uso eficiente de los recursos existentes.

- Coordinación con el hardware

Para ahorrar energía, el programador debe tener un conocimiento avanzado del hardware del dispositivo. Algunas recomendaciones relacionadas con el hardware: 1) Si el procesador tiene múltiples niveles de caché, utilizar el nivel más bajo de caché de instrucción o datos posible, esto genera menos actividad en el bus y en consecuencia un ahorro de energía. 2) Si una sección de código necesita usar memoria externa, utilizarla lo menos posible. 3) En lo posible, no utilizar instrucciones de punto flotante u otras que pueda encender cualquier otra unidad funcional, a menos que el uso de estas instrucciones acorte significativamente el tiempo de actividad de la CPU.

- Programación concurrente

El uso adecuado de la programación multi-hilo puede ser utilizado para mejorar la eficiencia energética. Por ejemplo, el uso de varios subprocesos puede ahorrar energía cuando tiene esperas de E/S. En lugar de tener toda la aplicación inactiva esperando por E/S, un solo hilo puede esperar mientras los demás hilos realizan otras actividades.

- Inicialización diferida

Es un patrón de diseño comúnmente usado en la programación que consiste en retrasar la carga o inicialización de un objeto hasta el mismo momento de su utilización. La aplicación no inicializará los recursos al comenzar su ejecución, sino solo cuando sean estrictamente necesarios.

- Carrera a la inactividad (*race to idle*)

El programa completa la carga de trabajo lo más rápido posible para luego ir a un estado de inactividad que consuma menos energía.

- Estructuras de datos eficientes

El uso de estructuras de datos de alto nivel debe evitarse cuando sea innecesario y en su lugar deben preferirse estructuras de datos simples.

En [27] se presenta CARAT: Collaborative Energy Diagnosis for Mobile Devices, se trata de una herramienta de software que utiliza a la comunidad de usuarios para verificar que el consumo en los dispositivos móviles se encuentre dentro de parámetros normales. Usa los datos de consumo de la comunidad para inferir una especificación (uso esperado de energía), luego compara el uso de energía de un celular con la especificación y detecta desvíos en el consumo (anomalías).

CARAT permite detectar las siguientes anomalías: “*Hogs*” o aplicaciones que acaparan la energía disponible y “*Bugs*” que hacen que la energía se consuma más rápido de lo esperado, en comparación con otros sistemas con la misma configuración.

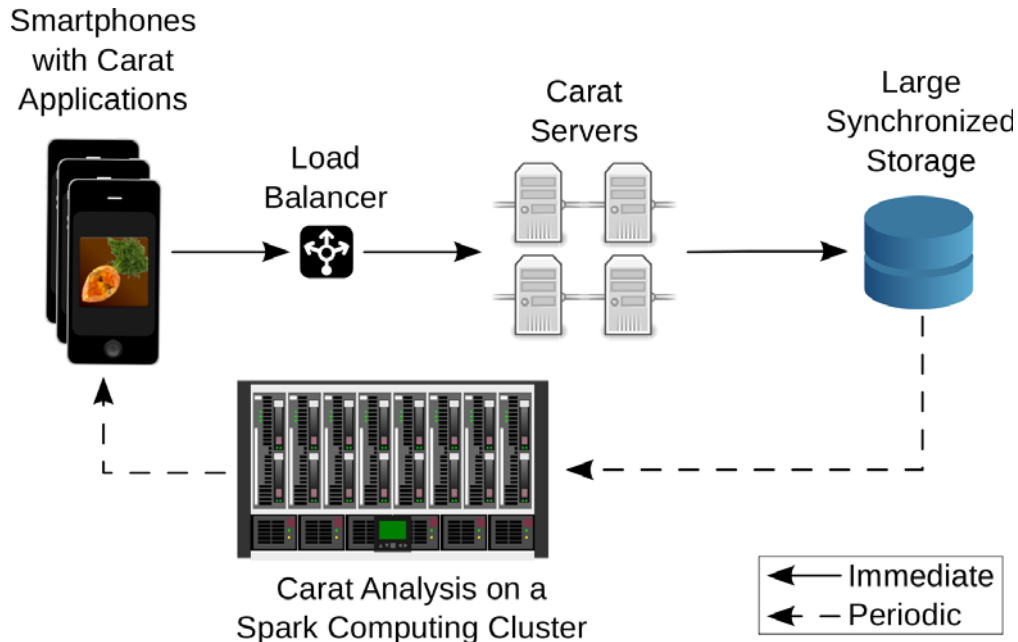


Figura 2-15: Arquitectura del proyecto CARAT  
Fuente: [27]

En la Figura 2-15 se ilustra el funcionamiento de CARAT, una aplicación móvil recopila datos mediante el registro de eventos de cambio de batería proporcionados por el sistema operativo y los envía a un cluster de servidores, donde son almacenados y comparados y analizados para determinar anomalías en el uso de batería (Hogs y Bugs). Si se detectan anomalías, estas son informadas al usuario del dispositivo a través de la aplicación móvil.

Los datos recibidos (muestras) son combinados para obtener distribuciones de consumo de energía, considerando características como: Usuarios, Aplicaciones, pares aplicación/usuario, versión del sistema Operativo, modelo del dispositivo. Las distribuciones son comparadas, usando la distancia entre sus barras de error de intervalo de confianza y la media. Si una distribución tiene una distancia positiva y una media más alta respecto de otra, existe una anomalía (Hog/Bug).

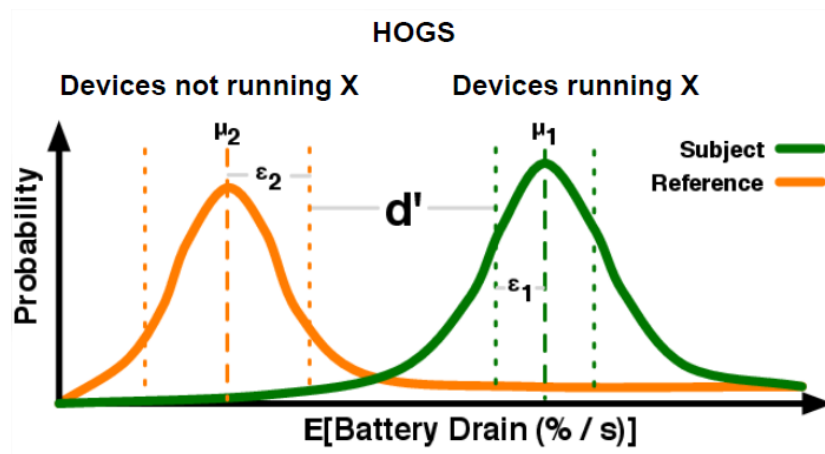


Figura 2-16: Comparación de distribuciones de consumo  
Fuente: [27]

En la Figura 2-16 se ilustra la comparación de dos distribuciones de consumo. La distribución de la izquierda del gráfico (consumo de referencia) corresponde a dispositivos que NO están ejecutando la aplicación X, mientras que la distribución de la derecha corresponde a dispositivos que sí están ejecutando la aplicación X. Se observa una diferencia entre las barras de intervalo de confianza (E1 y E2) y en la media (M1 y M2), esto indica que existe alguna anomalía.

También se efectuaron estudios desde el punto de vista del comportamiento humano, en [28] se presenta una investigación para determinar la forma en la que las personas cargan sus dispositivos móviles (patrones de carga). En el desarrollo del artículo se realiza una discusión de las implicancias de la conducta del usuario en la duración de la batería y el uso de la energía. Entre los estudios realizados se destaca la medición de los momentos en que los usuarios tienen sus teléfonos enchufados a la red eléctrica, en la Figura 2-17 se muestran los resultados, se observa que la mayoría de las instancias de carga comienzan entre las 5 p.m. y las 9 p.m., mientras que la hora menos popular para comenzar a cargar es de 3AM a 8AM.

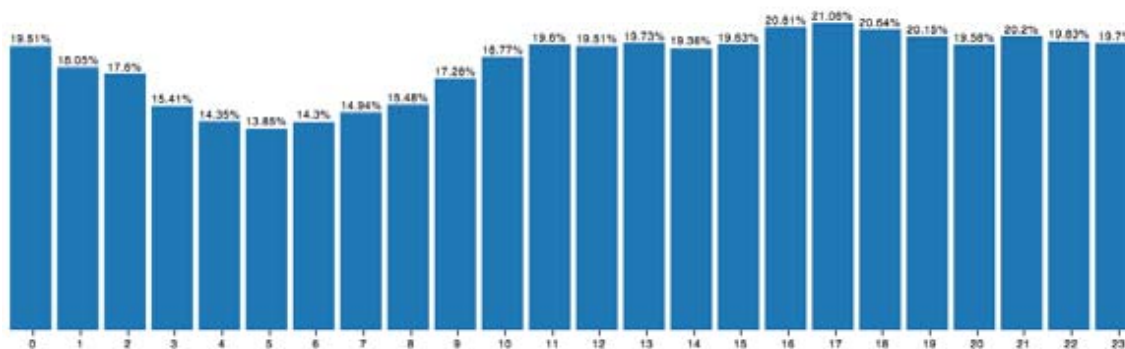


Figura 2-17: Instancias de carga  
Fuente: [28]

### 2.4.3 Herramientas para medir el consumo de energía

Los mecanismos utilizados para efectuar las mediciones de consumo energético de un dispositivo móvil, se pueden dividir en dos grupos principales:

1. Herramientas de hardware para medir la potencia con conexiones a circuitos internos a batería abierta. Estos instrumentos miden la corriente y/o el voltaje en los dispositivos y utilizan estos valores para calcular la potencia consumida.
2. Aplicaciones de software que estiman el consumo energético en base a: i) modelos de potencia, ii) librerías de programación iii) Sensores incorporados en los circuitos del dispositivo (*sensor-based*).

En la Tabla 2-4 se resumen las principales herramientas utilizadas para medir el consumo de energía.

|   |  |   |
|---|--|---|
| Hardware  | Moonson Low Voltage Power Monitor [17] | Multímetro. Se mide con conexión a circuito interno a batería abierta. Alta precisión. Elevado costo. Recolección de datos: Externa (por USB desde una aplicación para PC).   |
|   | USB Power Meter                        | Multímetro. Alta precisión. Bajo costo. Recolección de datos: Externa (por Bluetooth desde una aplicación móvil) e interna (Data logger en memoria SD).   |
| Software  | Android Powermanager [29]              | Librería de programación de Código abierto. Forma parte del API de programación de Android. Requiere programación para medir el consumo de energía, es útil para medir el consumo en aplicaciones en etapa de desarrollo, no sirve para aplicaciones ejecutables. |
|   | Powertutor [30]                        | Aplicación Móvil. La estimación del consumo se efectúa en base predicciones realizadas mediante un modelo de consumo de energía. Precisión media.   |
|   | Trepn Profiler [31]                    | Aplicación Móvil. Se puede utilizar solamente en celulares con chipset Snapdragon de gama baja (435), media (635) y alta (835). Sensor-based, precisión media.  |
|   | Snapdragon Energy Profiler [32]        | Aplicación para PC. Se puede utilizar solamente en celulares con chipset Snapdragon de gama alta (825, 835, 845 y 855). Sensor-based, precisión alta. Conexión por USB utilizando ADB (Android Debug Bridge)  |
| Tabla 2-4: Herramientas utilizadas para medir el consumo de energía |  |   |

A continuación se describen las principales características de las herramientas utilizadas para medir el consumo de energía en dispositivos móviles, y se justifica la elección de la herramienta utilizada para efectuar las mediciones en este trabajo de tesis.

### 2.4.3.1 Herramientas de Hardware

#### 2.4.3.1.1 Moonson Power Monitor

Es una herramienta que combina hardware (*Power Monitor*) y software (*Power Tool*) para proporcionar una solución robusta de medición de energía con elevada precisión para dispositivos móviles.

En la Figura 2-18 se ilustra el procedimiento de medición, Power monitor recibe energía desde una fuente externa y le entrega al dispositivo testeado la potencia que requiere para funcionar. *Powertool* se instala en una computadora conectada al monitor a través de un puerto USB y permite monitorear en tiempo real la potencia que consume el dispositivo testeado. Para realizar las mediciones de consumo la corriente debe ingresar en forma directa al dispositivo, sin pasar por la batería (*battery bypass*).

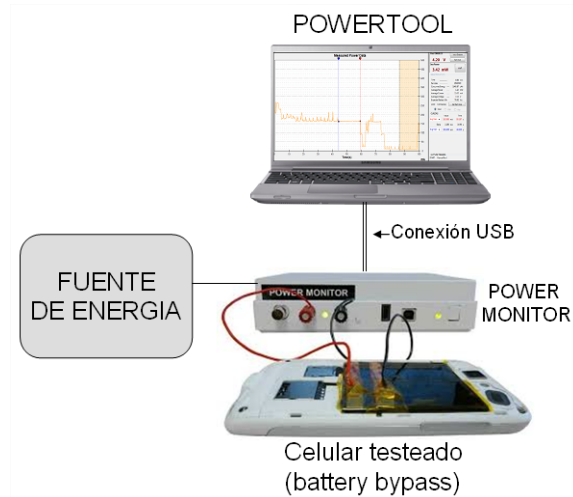


Figura 2-18: Medición del consumo de energía con Power Monitor

Con este instrumento es muy simple obtener la medición del consumo del sistema completo en el dispositivo testado, se dificulta determinar el consumo por componente de hardware, ya que requieren complicadas conexiones a nivel circuito.

#### 2.4.3.1.2 USB Power Meter

Es un instrumento de medición que detecta en tiempo real el voltaje, la corriente y la potencia entregada a un dispositivo móvil por una fuente de energía (Figura 2-19). La mayoría de estos dispositivos incluyen una aplicación que permite conectarse al Power meter desde un celular de monitoreo. Esta aplicación toma los valores capturados por el *power meter*, los muestra en pantalla y los almacena en archivos de texto (logs). Los archivos pueden ser procesados al finalizar el test para determinar el consumo promedio del celular testado.

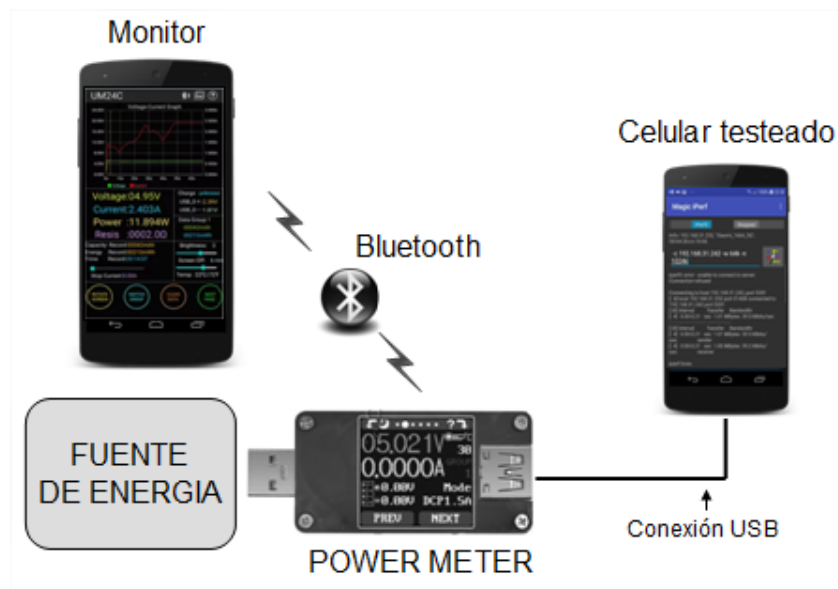


Figura 2-19: Medición con un Power Meter



### 2.4.3.2 Herramientas de Software

Imaginemos el siguiente escenario: Un usuario de dispositivo móvil, utilizando el nivel de carga de la batería como herramienta de medición, intenta determinar el consumo de energía de una aplicación “A”: El consumo de un equipo es de 100 mW cuando se ejecuta la aplicación “A”, y es de 20 mW cuando no, se infiere entonces un consumo de 80mW para la aplicación “A”. Si ejecuta la aplicación “A” y una aplicación “B” al mismo tiempo el consumo pasa a ser de 200mW, y es de 160 mW cuando solo se ejecuta la aplicación “B”, se infiere entonces que la aplicación “A” consume 40 mW. La pregunta que se hace este usuario es ¿Cuál es el verdadero consumo de la aplicación “A” 40mW o 80mW?

Para evitar estas inconsistencias, se deben utilizar herramientas de software que brinden información detallada (*Fine-grained*) acerca del consumo de energía en el dispositivo móvil. Con base en esta información se puede estimar correctamente el consumo de energía por aplicación y por componente de hardware.

Estas herramientas permiten a usuarios finales seleccionar las aplicaciones a instalar y/o ejecutar en su dispositivo móvil, en función del consumo energético de las mismas; a desarrolladores de aplicaciones móviles dimensionar el impacto de sus aplicaciones en el consumo de energía de un dispositivo móvil, facilitando el uso de buenas prácticas de programación que reduzcan el consumo de energía de las aplicaciones (*power aware* y *network aware programming*); y a administradores de red, implementar redes optimizando el consumo de la energía disponible. En la Tabla 2-5 se enumeran algunos factores que un administrador de red debe considerar.

| Categoría                  | Factores a considerar  |
|----------------------------|--|
| Diseño físico de la red    | - Cantidad máxima de nodos.<br>- Distancia entre los nodos y los dispositivos de comunicación para minimizar la potencia de transmisión. |
| Tecnología WAN a utilizar  | - 4G, 3G vs 2G.  |
| Tecnología WLAN a utilizar | - Wifi vs Bluetooth.   |
| Protocolos de comunicación | - TCP vs UDP<br>- IP over Bluetooth (BNEP) vs IP over Ethernet   |

Tabla 2-5: Cuestiones a considerar para diseñar una red, optimizando el consumo de energía

Las siguientes características son deseables para este tipo de aplicaciones o herramientas de software:

- No utilizar dispositivos externos para las mediciones, se deben utilizar sensores incorporados en el dispositivo móvil (internos) y/o llamadas a funciones del SO.
- No requerir modificaciones en el software del sistema (BIOS, Kernel del SO, etc.).
- Estimar el consumo de energía en tiempo real y de manera autónoma (sin depender de otros procesos o aplicaciones).
- Brindar información detallada y de bajo-nivel (*Fine-grained*) acerca del consumo de energía. Por ejemplo: La aplicación “A” consume 40 mW, de los cuales 10 mW corresponden a CPU, 20 mW a LCD/AMOLED, 3 mW a sistema 2G/3G, 4mW a sistema Wifi Y 3mW a sistema Bluetooth.

- Portabilidad del sistema, esto significa que no debe ser dependiente de la configuración del dispositivo móvil.
- El análisis gráfico de las mediciones de potencia y energía debe ser fácil de usar, para ello la interfaz de usuario (UI) debe estar diseñada para dispositivos con pantalla reducida y capacidades de entrada restringidas.
- Los resultados deben presentarse de dos maneras:
  1. Utilizando gráficos que posibiliten el análisis de los resultados de forma inmediata y sin necesidad de transferir archivos entre el dispositivo móvil y una PC.
  2. Guardando las mediciones de consumo en archivos de texto (logs), los cuales se pueden transferir a una PC para realizar un análisis detallado de los resultados.

#### 2.4.3.2.1 Android Powermanager

Powermanager [29] está formado por un grupo de funciones de código abierto, que forman parte del API de programación de Android. Estas funciones están diseñadas para ser utilizadas por programadores de aplicaciones que requieren optimizar el consumo de energía de aplicaciones en desarrollo, entre otras cosas, permiten detectar secciones de código que comprometen los recursos de energía de un dispositivo móvil.

#### 2.4.3.2.2 Powertutor

Powertutor [30] es una aplicación Android de libre distribución. Informa a desarrolladores y/o usuarios de sistemas Android el consumo de energía detallado en tiempo real y por aplicación de los siguientes componentes: CPU, LCD, Wifi, *Bluetooth*, red celular (2G y 3G).



Figura 2-20: Powertutor. Estadísticas de consumo de energía “por aplicación”

Fuente: [18]

La Figura 2-20 muestra las estadísticas de consumo de energía reportadas por Powertutor, se observa el consumo en Joules de las aplicaciones que se encuentran en ejecución. Por ejemplo: *iperf* (270 mJ) y *Bluetooth Subsystem* (28mJ).

El modelo de energía utilizado por Powertutor para estimar el consumo de energía de las aplicaciones y de los diferentes componentes de hardware del dispositivo móvil, se denomina “*PowerBooter*” y se describe con detalle en [18]. La implementación de “*PowerBooter*” se divide en dos partes: Construcción del modelo de energía y Asignación de energía a las aplicaciones.

### Construcción del modelo de energía de Powertutor

Cada componente de hardware en un dispositivo móvil (*smartphone*) tiene estados de energía que influyen en el consumo de energía del teléfono. Por ejemplo: la utilización de la CPU, el nivel de brillo de la pantalla, la potencia de transmisión, entre otros. El modelo de energía en PowerTutor se construye mediante la correlación del consumo de energía medido y los estados de energía de hardware [18]. En la Tabla 2-6 se detallan los estados de energía considerados en este modelo.

| Hardware   | Estados de energía   |
|------------|--|
| CPU        | Utilización de la CPU y el nivel de frecuencia.  |
| OLED / LCD | Para el hardware con pantalla LCD se tiene en cuenta el nivel de brillo, para hardware con pantalla y/o la pantalla OLED se considera el nivel de brillo y la información de píxeles de la pantalla. |
| Wifi       | Tasa de datos o velocidad de datos de enlace ascendente y paquetes transmitidos por segundo.   |
| 2G/3G/4G   | Paquetes transmitidos por segundo y potencia de transmisión.   |
| GPS        | Número de satélites detectados y estados de potencia del dispositivo GPS (activo, dormido, apagado).   |

Tabla 2-6: Estados de energía que influyen en el consumo de energía de un dispositivo móvil

### Asignación de consumo (potencia/energía) a las aplicaciones

El uso de energía se asigna a una aplicación como si esta fuera la única en ejecución. La razón de esto es que a veces, cuando dos aplicaciones se están ejecutando al mismo tiempo pueden causar que algunos de los componentes de hardware tengan una transición de estado, que no tendría lugar si solo una de las aplicaciones se estaría ejecutando. En este tipo de casos no está claro cómo asignar la utilización de energía a cada aplicación.

Por ejemplo, consideremos el caso en el que dos aplicaciones “A” y “B” requieren transmitir datos por la interfaz Wifi. Si la aplicación “A” se ejecuta sola, el dispositivo inalámbrico transmite en un estado de potencia baja (*low power*) y utiliza una cantidad baja de mW. Sin embargo, si “A” y “B” se ejecutan juntas el dispositivo inalámbrico pasa a un estado transmisión de potencia alta (*high power*) y utiliza una cantidad alta de mW, se plantea el problema de cómo dividir la potencia utilizada para transmitir entre las aplicaciones “A” y “B” de una manera razonable.

Para resolver este problema Powertutor predice y simula estados de hardware para cada aplicación, suponiendo que se ejecuta sola. Con los estados simulados, es posible calcular la cantidad de energía que cada aplicación utilizaría. En el ejemplo anterior a cada

aplicación se le asignará un consumo por usar el dispositivo móvil en el estado de bajo consumo, salvo que la aplicación hubiera sido la causante de la transición al estado de transmisión de potencia alta.

#### 2.4.3.2.3 Trepn Profiler

Trepn profiler [31] es una herramienta que permite realizar mediciones de rendimiento y de consumo de energía de aplicaciones Android que se ejecutan en dispositivos móviles con procesadores Snapdragon [33]. Trepn Profiler utiliza una plataforma de desarrollo denominada Mobile Development Platform (MDP) [34] diseñada para facilitar el acceso a la siguiente información:

- Porcentaje y frecuencia de uso de la CPU
- Consumo de energía
- Estadísticas de consumo de memoria física y virtual
- Utilización de la red celular y Wifi

El consumo de energía se mide a través de sensores (*sensor-based*) que incorporan los procesadores Snapdragon, esto permite una mayor precisión en las mediciones. Los sensores internos miden el consumo de energía en cada núcleo del procesador y a partir de estos valores obtienen el consumo total de energía (Figura 2-21).

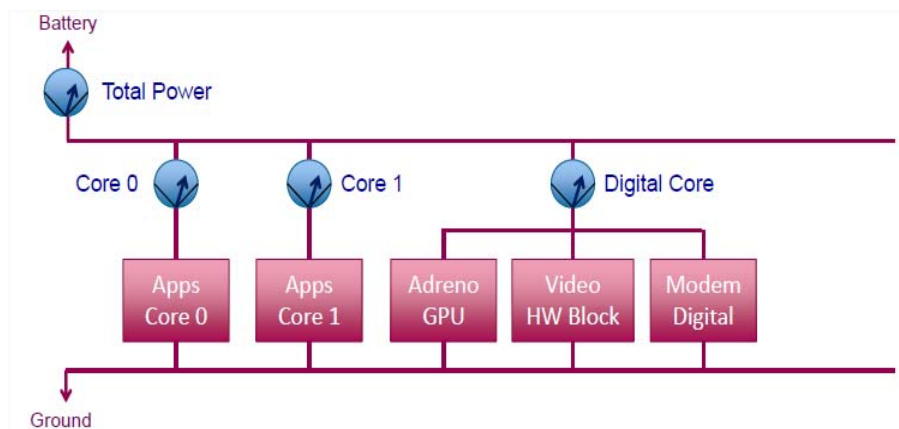


Figura 2-21: Sensores incorporados en los procesadores Snapdragon  
Fuente: [35]

En [36] se explica en forma detallada el funcionamiento de esta herramienta, se presentan ejemplos de aplicaciones de prueba con alta y baja utilización de recursos, en cada ejemplo se determina el consumo de energía de la aplicación, se interpretan los resultados y finalmente se presentan los cambios necesarios para optimizar el código de la aplicación para reducir el consumo de energía.

En la Figura 2-22 se presentan capturas de pantalla de Trepn Profiler con los resultados de la medición del consumo energético para la aplicación Whatsapp. Se observa que esta aplicación fue ejecutada durante 87,44 segundos consumiendo una potencia promedio de 2537 mW con un pico máximo de 9600 mW y un mínimo de 300 mW.

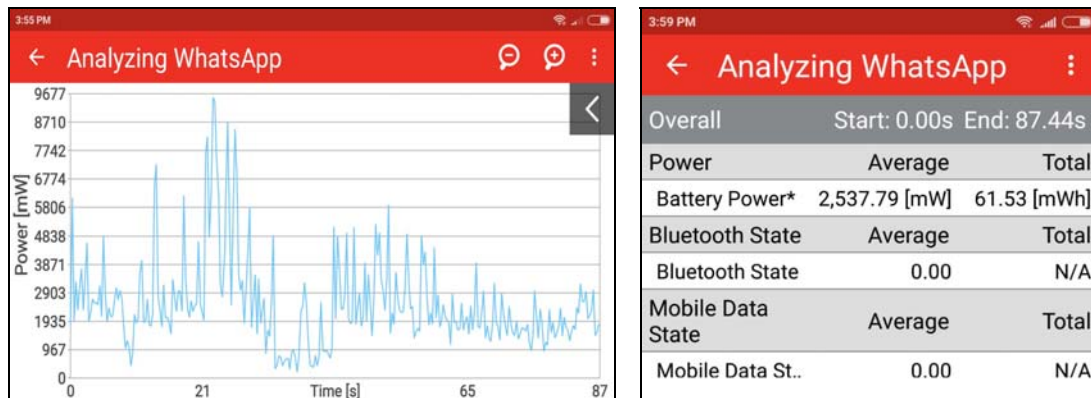


Figura 2-22: Trepn Profiler. Consumo de energía en mW de una aplicación en función del tiempo.  
Fuente: Elaboración propia

#### 2.4.3.2.4 Snapdragon Profiler

Snapdragon Profiler [32] es un software de creación de perfiles de ejecución de aplicaciones en dispositivos Android con procesadores Snapdragon. Posibilita a los desarrolladores encontrar y corregir problemas de rendimiento en un dispositivo móvil, analizando datos de: CPU, GPU, DSP (Digital Signal Processor), Memoria, Energía, Temperatura y Red.

A diferencia de Trepn Profiler, que se ejecuta en el mismo dispositivo, este Profiler se ejecuta en una computadora con sistema operativo Windows o Linux y se conecta con el dispositivo a través de un puerto USB, utilizando ADB (Android Debug Bridge).

ADB es una herramienta de líneas de comandos que permite realizar diferentes acciones en los dispositivos, como la instalación y depuración de aplicaciones, obtención de perfiles de rendimiento y consumo de energía. Tiene una arquitectura cliente-servidor que incluye tres componentes:

- Un cliente, que envía comandos. El cliente se ejecuta en la máquina de desarrollo. Se puede invocar un cliente desde un terminal de línea de comandos emitiendo un comando de ADB.
- Un demonio, que ejecuta comandos en un dispositivo. El demonio se ejecuta como un proceso en segundo plano en cada instancia del emulador o dispositivo.
- Un servidor, que administra la comunicación entre el cliente y el demonio. El servidor se ejecuta como un proceso en segundo plano en la máquina de desarrollo.

A continuación se resumen las principales características de Snapdragon Profiler:

- Presenta una vista en tiempo real que facilita la correlación del uso de recursos del sistema en una línea de tiempo (Figura 2-23).
- Muestra la planificación de los núcleos de una CPU para detectar dónde está pasando mayor tiempo una aplicación (Figura 2-24). El modo de rastreo (trace) permite visualizar eventos a nivel núcleo y analizar los eventos del sistema de bajo nivel.
- Guarda trazas de ejecución, para su posterior análisis.
- Trabaja con procesadores Qualcomm de gama alta (Snapdragon 820 o superior).



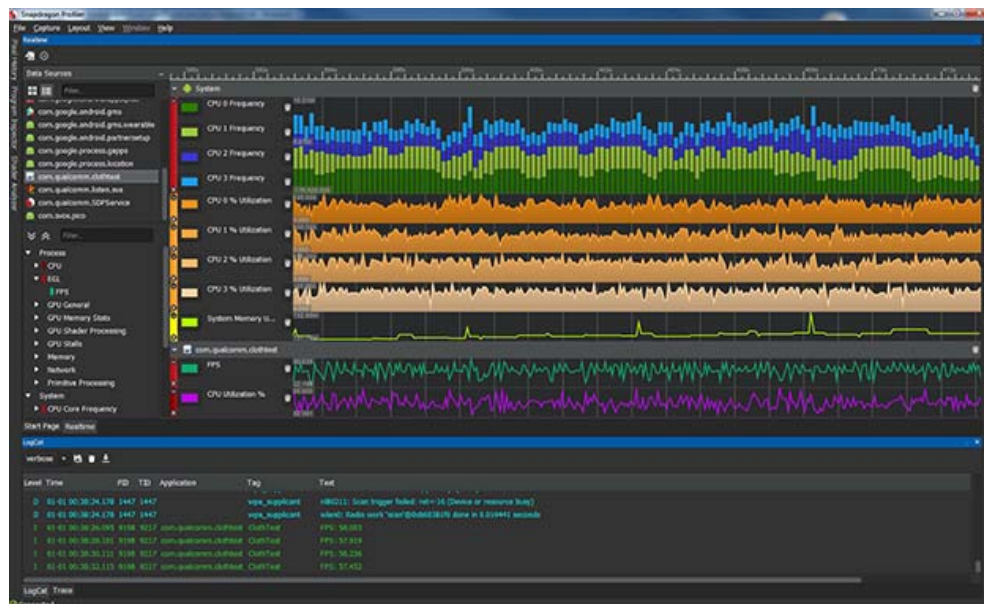


Figura 2-23: Snapdragon profiler – Correlación de recursos

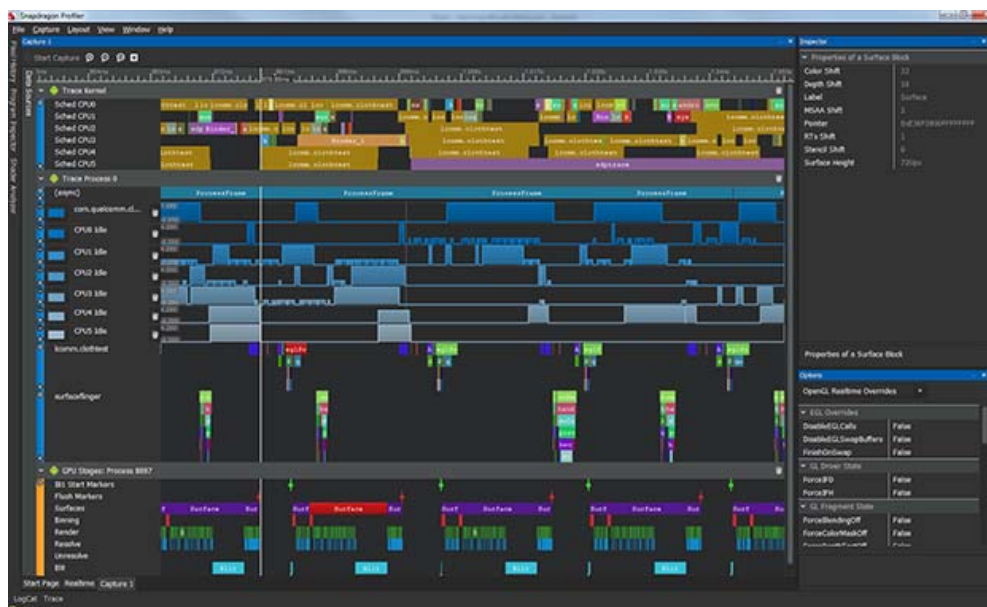


Figura 2-24: Snapdragon profiler – Planificación de la CPU

## 2.5 Medición del rendimiento en dispositivos móviles

Las mediciones de rendimiento (o performance) pueden ser activas o pasivas. Las mediciones activas inyectan tráfico a través de la red y observan el efecto del mismo, mientras que las mediciones pasivas observan el tráfico de red existente.

En la Tabla 2-7 se presenta un resumen de las principales métricas utilizadas para evaluar el rendimiento de una red. Todas las métricas de la tabla son utilizadas para efectuar

mediciones activas. Además, se incluye una columna con las herramientas utilizadas para efectuar la medición.

| Métrica                                 | Descripción  | Herramientas  |
|---|--|---|
| Latencia                                | El tiempo que tarda (retardo) en llegar un paquete enviado desde un emisor a un receptor. Puede ser de ida y vuelta (RTT) o solo ida ( <i>One way</i> ).   | - Ping, Thrulay (RTT)<br>- OWAMP (One Way)  |
| <i>Jitter</i>                           | Es la fluctuación del retardo, se utiliza para detectar congestión en una red.   | - Thrulay   |
| <i>Path</i>                             | Trayectoria o ruta que sigue un paquete desde un emisor hasta llegar al receptor (Número de saltos, retardo entre salto, etc.).  | - Traceroute.<br>- MTR. Herramienta híbrida que busca la trayectoria y calcula el retardo en cada salto |
| <i>Bandwidth</i><br>/ <i>Throughput</i> | Bandwidth. Cantidad máxima de datos que un dispositivo puede enviar datos a través de un canal de comunicación en un periodo de tiempo.<br>Throughput. Cantidad de datos que un dispositivo está en realidad enviando a través de un canal de comunicación | - Iperf (Throughput TCP)<br>- Wget (Throughput HTTP)  |
| Paquetes perdidos ( <i>Loss</i> )       | Porcentaje de paquetes enviados que no llegan a destino.   | - Ping<br>- Traceroute.   |

Tabla 2-7: Métricas de rendimiento

Fuente: [37]

A continuación se describen las principales características de las métricas utilizadas en esta tesis: Latencia y Throughput.

### 2.5.1 Latencia

Se denomina latencia a la suma de retardos temporales dentro de una red, los factores que influyen en la latencia de una red son:

- El retardo de propagación, es el tiempo que demora un bit que se envía desde el emisor hasta llegar al receptor. Depende de la distancia entre el emisor y el receptor y la velocidad a la que viajan los datos por el medio físico de transmisión, generalmente la velocidad de la luz.
- El retardo de transmisión, es el que tiempo toma inyectar una cantidad determinada de bits (trama). Depende de la capacidad del canal y del tamaño de trama.
- Los retardos introducidos por los dispositivos intermedios (repetidores, amplificadores, conmutadores, *routers*, *gateways*, etc.).
- El tamaño de los paquetes transmitidos.
- El tamaño de los *buffers* en los equipos de conectividad intermedios. Si un paquete transmitido queda encolado, se introduce un retardo adicional.

La latencia se puede calcular utilizando el tiempo que tarda un paquete enviado desde un emisor en volver a este mismo habiendo pasado por el receptor de destino (RTT, Tiempo de ida y vuelta), o bien utilizando el tiempo que tarda un paquete enviado desde un emisor a un receptor (*One Way*). *One Way* no necesariamente es RTT/2.

## 2.5.2 Throughput

En transmisión de datos, el *Throughput* es la cantidad de datos “útiles” transferidos con éxito de un extremo a otro a través de un canal en un período de tiempo dado. Generalmente se expresa en bits por segundo (bps).

No se debe confundir *Throughput* con *Bandwidth* (Ancho de banda). El ancho de banda representa la capacidad teórica de un canal y el *Throughput* la capacidad real alcanzada en ese canal, en la Tabla 2-8 se señalan algunas diferencias.

| Bandwidth  | Throughput  |
|--|---|
| Capacidad teórica del canal  | Utilización que se puede lograr del canal (Ancho de banda alcanzable)                               |
| Cantidad máxima de datos que un dispositivo puede enviar a través de un canal de comunicación. | Cantidad de datos que un dispositivo está en realidad enviando a través de un canal de comunicación |
| $Bandwidth \geq Throughput$  | $Throughput \leq Bandwidth$   |
| También conocido como “ <i>Throughput</i> Máximo”  | También conocido como “Ancho de banda consumido”  |

Tabla 2-8: Diferencias entre ancho de banda y *throughput*

Si un canal está formado por enlaces de diferentes tamaños (Figura 2-25):

- La capacidad del canal (extremo a extremo) está dada por la capacidad del enlace con la menor capacidad (*Narrow Link*) a lo largo de una ruta.
- El ancho de banda disponible está dado por la capacidad del canal (extremo a extremo) menos el ancho de banda utilizado (carga de tráfico actual).
- El enlace más ajustado (*Tight Link*) es aquel que tenga disponible el ancho de banda más pequeño a lo largo de la ruta.

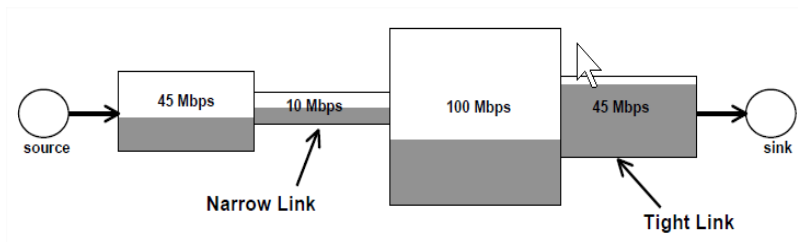


Figura 2-25: Canal extremo a extremo con enlaces de diferentes tamaños

Fuente: [37]

También se debe tener en cuenta que los protocolos de comunicaciones introducen encabezados (*overhead*), que son transmitidos junto con la carga útil de datos (*payload*), e impactan directamente en el *Throughput*. A continuación se presentan dos ejemplos que muestran la diferencia de *Throughput* cuando se utilizan encabezados de diferentes tamaños:

- Ejemplo1:

Si se transmiten tramas de 550 bytes con un *payload* de 512bytes y un *overhead* de 38 bytes por un canal con una capacidad de 10 Mbps, el *throughput* o ancho de banda alcanzable será:

Frame rate = capacidad del canal/tamaño total de la trama



$\text{Frame rate} = 10.000.000 / ((512 + 38) \times 8) = 2272,72$   
 $\text{Throughput} = (\text{Frame rate} \times \text{payload}) = 2272,72 \times (512 \times 8) = 9309061,12 = 9,3 \text{ Mbps}$   
**Throughput = 9,3 Mbps**

- Ejemplo2:

Ídem al ejemplo 1, utilizando 60 bytes de overhead en lugar de 38:

Frame rate = capacidad del canal/tamaño total de la trama

$\text{Frame rate} = 10.000.000 / ((490 + 60) \times 8) = 2272,72$

$\text{Throughput} = (\text{Frame rate} \times \text{payload}) = 2272,72 \times (490 \times 8) = 8909062,4 = 8,9 \text{ Mbps}$

**Throughput = 8,9 Mbps**

Se observa que el *throughput* baja de 9,3 Mbps a 8,9 Mbps cuando el *overhead* crece.

### 2.5.3 Herramientas para medir el rendimiento

En la Tabla 2-9 se presentan las aplicaciones Android utilizadas para obtener las métricas de rendimiento.

| Métrica    | Protocolo | Aplicación Android |
|------------|-----------|--------------------|
| Latencia   | ICMP      | Ping               |
| Throughput | TCP       | Iperf [38]         |

Tabla 2-9: Aplicaciones utilizadas para obtener las métricas de rendimiento

#### 2.5.3.1 Ping

Ping es una herramienta diseñada para medir la latencia de ida y vuelta entre un dispositivo móvil y un servidor. La aplicación forma parte del paquete de aplicaciones Android y se utiliza desde línea de comandos. Por lo tanto, para poder utilizarla, primero se debe instalar un emulador de terminal en el dispositivo.

```

u0_a71@android:/system/xbin $ ping -c3 170.210.201.211
PING 170.210.201.211 (170.210.201.211) 56(84) bytes of data:
64 bytes from 170.210.201.211: icmp_seq=1 ttl=127 time=13.6
ms
64 bytes from 170.210.201.211: icmp_seq=2 ttl=127 time=51.2
ms
64 bytes from 170.210.201.211: icmp_seq=3 ttl=127 time=9.11
ms
--- 170.210.201.211 ping statistics ---
3 packets transmitted, 3 received, 0% packet loss, time 2003
ms
rtt min/avg/max/mdev = 9.114/24.665/51.229/18.874 ms
u0_a71@android:/system/xbin $

```

Figura 2-26: Ping desde un emulador de terminal para Android

En la Figura 2-26 se muestra el funcionamiento de la aplicación Ping, la misma se ejecuta desde línea de comandos utilizando el Emulador de Terminal para Android de Jackpal [39].

Entre los resultados que presenta la herramienta se destacan: La cantidad de paquetes transmitidos, el porcentaje de paquetes perdidos y tiempo de ida y vuelta o RTT (mínimo, máximo y promedio). Estos resultados pueden ser redirigidos a un archivo de texto, lo que permite realizar un gran número de pruebas secuenciales y almacenar los resultados de cada prueba en un mismo archivo. Al finalizar las pruebas, el archivo de resultados puede ser transferido a una PC para ser procesado y analizado.

### 2.5.3.2 Iperf

Iperf [40] es una herramienta desarrollada por NLANR/DAST como una alternativa para medir el rendimiento de los protocolos TCP y/o UDP (extremo a extremo) en una red. Permite al usuario configurar varios parámetros que pueden ser utilizados para determinar el rendimiento de una red, o alternativamente para la optimización y puesta a punto de la misma.

Iperf inyecta tráfico TCP (o UDP) en un canal que comunica a un cliente y un servidor y mide los tiempos de transferencia, la cantidad de datos transferidos y el *throughput* o ancho de banda alcanzable. El tráfico entre los dos extremos puede ser unidireccional o bidireccional.

Los parámetros que se pueden utilizar en el servidor son:

```
iperf -s -o <logfile>
```

-s indica que es un servidor

-o almacena los resultados en un archivo de texto: <logfile>

Los parámetros que se pueden utilizar en el cliente son:

```
iperf -c <IP server> -w <tamaño ventana> -l <tamaño buffer> -n <payload>
```

-c indica que es un cliente

<IP server> IP del servidor, es necesario conocer la dirección IP del servidor donde se ejecuta Iperf en modo servidor.

-w tamaño ventana TCP en kbytes.

-l tamaño del buffer de lectura escritura.

-n total de Kbytes de carga útil (*payload*) a transmitir, sin importar el tiempo.

Para mostrar el funcionamiento de esta herramienta, se presenta a continuación un ejemplo de transferencia entre un cliente Android y un servidor Debian.

Ejemplo: Transferencia TCP entre un cliente Android y un servidor Debian, con los siguientes parámetros: *Payload* de 1024 Kbytes, tamaño de ventana TCP de 64Kbytes, tamaño de los buffers de lectura escritura de 8kbytes y dirección IP del servidor 190.221.183.220. Archivo de resultados de salida log001.txt, almacenado en el servidor.

| SERVIDOR DEBIAN  | CLIENTE ANDROID  |
|--|--|
| #iperf3 -s -o log001.txt   | Iperf3 -c -c di.unsa.edu.ar -p 5201 -n 1024k                                       |
| -----  | -----  |
| Server listening on TCP port 5201<br>TCP window size: 64.0 Kbyte (default) | Client connecting to 190.221.183.220, TCP port 5001<br>TCP window size: 64.0 Kbyte |
| -----  | -----  |
| [ 4] local 192.168.1.147 port 5001 connected with 181.87.91.41 port 4147   | [ 3] local 192.168.44.27 port 56955 connected with 190.221.183.220 port 5001       |
| [ID] Interval      Transfer      Bandwidth                                 | [ID] Interval      Transfer      Bandwidth   |
| [ 4] 0.0-85.9 sec 1.00 Mbytes 97,65 Kbits/sec                              | [ 3] 0.0-85.5 sec 1.00 Mbytes 98,1 Kbits/sec                                       |

Tabla 2-10: Ejemplo de uso de Iperf

Fuente: elaboración propia

En los resultados del cliente observamos un tiempo de 85,5 segundos para transferir un *payload* o carga útil de datos de 1 Mbyte (1024 Kbytes), a partir de estos valores Iperf calcula el *throughput* de la siguiente forma:

$$\text{Throughput} = 1024\text{Kbytes}/85,5\text{seg} = (1024 \times 1024 \times 8)\text{bits}/85,5\text{seg} = 98112,37 \text{ bps}$$

$$\text{Throughput} = 98112,37 / 1000 = 98,1 \text{ kbps}$$

El *throughput* o ancho de banda alcanzado para esta prueba es de 98,1 Kbps.

**Aclaración:** En el encabezado de los resultados aparece la leyenda *bandwidth* en lugar de *Throughput*. Esto se debe a que Iperf presenta el *throughput* como ancho de banda alcanzable.

La aplicación Iperf fue elegida para efectuar las mediciones de esta tesis, por tratarse de una herramienta de código abierto que se puede ejecutar en diferentes plataformas, incluyendo Linux y Android.

### Magic Iperf para Android

Magic Iperf [38] es una aplicación que implementa la versión 3 de Iperf para medir el rendimiento de una red desde un dispositivo móvil. La aplicación es de libre distribución y se puede descargar desde la tienda de aplicaciones de Google [41].

La interfaz gráfica de la aplicación es básica y requiere el uso de la línea de comandos para introducir los parámetros. En la Figura 2-27 se observa el funcionamiento de un cliente iperf con los siguientes parámetros: modo cliente (-c), dirección IP del servidor iperf3 (di.unsa.edu.ar), puerto 5201 (-p 5201) tiempo del test 60 segundos (-t 60) y transferencia de 1024 Kbytes de carga útil (-n 1024k).

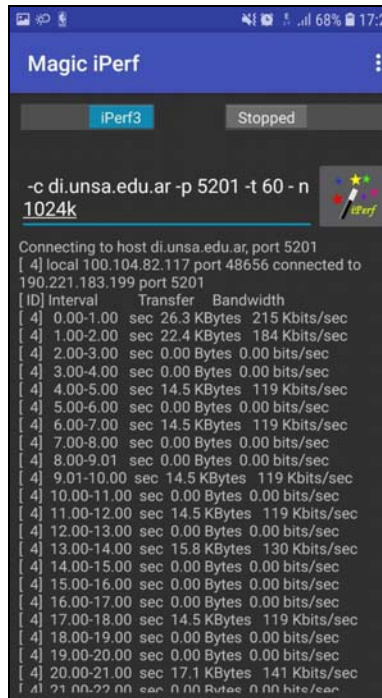


Figura 2-27: Iperf para Android

Para obtener mejores resultados y debido a que el rendimiento se encuentra limitado por la capacidad del dispositivo más lento, es recomendable realizar las pruebas entre un cliente Android y un servidor Debian o Linux.

## 2.6 Energía solar fotovoltaica

La energía solar es la energía presente en la radiación solar que puede ser transformada mediante los correspondientes dispositivos, en forma de energía térmica o energía eléctrica, para su consumo allá donde se necesite.

El planeta tierra recibe del sol una cantidad de energía anual de aproximadamente 1,6 millones de kWh, de los cuales sólo un 40% es aprovechable [42]. Este aprovechamiento está condicionado por la intensidad de radiación solar, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada lugar.

La tecnología fotovoltaica se utiliza para convertir la radiación solar en electricidad. Está basada en el efecto fotoeléctrico, empleando dispositivos denominados celdas fotovoltaicas, los cuales son materiales sensibles a la luz solar; de manera que cuando se expone a esta, se produce en la celda una circulación de corriente eléctrica entre sus dos caras.

Actualmente ya es competitiva para proveer de energía eléctrica a lugares alejados del Sistema Interconectado Nacional (SIN) [43]. Entre muchas de sus ventajas pueden mencionarse:

- Se evita el costoso tendido y mantenimiento de las líneas eléctricas en zonas de difícil acceso.
- Elimina costos ambientales y estéticos de la instalación de líneas en esas zonas.
- Contribuye a evitar la emigración de pobladores de zonas aisladas.

- Es una energía descentralizada que puede ser captada y utilizada en cualquier lugar donde se localice la demanda.
- Una vez instalada tiene un costo energético bajo.
- Posee bajo costo de mantenimiento y riesgo de fallas muy bajo.
- Las instalaciones son modulares, se puede aumentar o reducir la potencia instalada fácilmente según las necesidades.
- No produce contaminación de ningún tipo
- Se trata de una tecnología en rápido desarrollo que tiende a reducir el costo y aumentar el rendimiento.

El estado argentino a través de la Ley 26190 promulgada el año 2006 y su modificatoria Ley 27191 promulgada el año 2015, establece el “Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica”. La ley declara de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía renovables con destino a la prestación de servicio público como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad. Establece como objetivo del presente régimen, lograr una contribución de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025.

Para conseguir este objetivo se impulsó el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) [44], destinado a mejorar la calidad de vida de los pobladores rurales y disminuir su emigración hacia zonas urbanas, a través del manejo sustentable de recursos energéticos ambientalmente sanos, proveyendo electricidad a instituciones y habitantes que se encuentran fuera del alcance de los centros de distribución de energía. En este sentido, el PERMER está entregando a familias de estas zonas equipos fotovoltaicos portátiles para brindar acceso básico a la energía eléctrica a familias del país que aún no dispongan de ella. Cada hogar beneficiario, recibe un kit solar domiciliario y lámparas solares. El equipo es de fácil traslado e instalación, incorpora una radio AM/FM, puede brindar iluminación fija a los ambientes de un hogar y permite cargar teléfonos celulares.

Por otra parte, el Gobierno anunció el regreso del programa Conectar Igualdad que tiene como meta principal la de promover la igualdad de oportunidades entre todos los jóvenes del país, brindándoles un instrumento que permita achicar la brecha digital. En esta segunda etapa se planea entregar celulares (además de computadoras) a estudiantes de todo el país. Estos equipos serán repartidos en zonas urbanas, rurales y rurales aisladas. En este último caso existirán problemas con las posibilidades de recarga debido a las limitaciones energéticas propias de este tipo de zonas.

Si bien los sistemas fotovoltaicos actualmente son utilizados en muchas zonas aisladas, generalmente en comunidades rurales donde tuvo intervención el PERMER; el aprovechamiento de la energía solar para facilitar el uso de celulares no está lo suficientemente difundido. En este trabajo se introduce la aplicación de la tecnología fotovoltaica para proporcionar energía a los dispositivos móviles, contribuyendo a mejorar las posibilidades de comunicación de los pobladores de estas regiones.

## 2.6.1 Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos se componen de un conjunto de celdas interconectadas que se agrupan en serie y/o paralelo de tal forma que reúnan condiciones óptimas para su posterior utilización en sistemas de generación de energía, convirtiendo la energía solar en energía eléctrica (Figura 2-28).

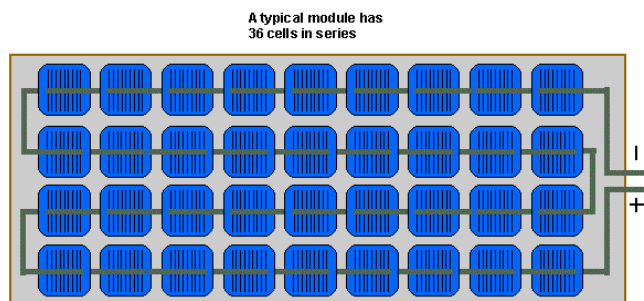


Figura 2-28 : Módulo fotovoltaico con 36 celdas en serie

Fuente: [45]

Existen muchos tipos de módulos fotovoltaicos, la variedad más encontrada en el mercado es la de paneles de silicio los cuales están conformados por celdas de 0.5-0.6V cada una, de silicio mono o poli cristalino, también amorfo. En la Tabla 2-11 se resumen las características de las principales tecnologías utilizados para la construcción de celdas:




| Tipo de panel   |                | Rendimiento Laboratorio | Rendimiento directo | Características   |
|---|----------------|-------------------------|---------------------|---|
|   | Monocrystalino | 24%                     | 15 a 18%            | Las celdas son de color azul oscuro homogéneo, se distingue la conexión de las celdas individuales entre si.                |
|  | Policristalino | 19-20%                  | 12 a 14%            | La celda es de aspecto azulado, pero no es uniforme, se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales. |
|  | Amorfo         | 16%                     | <10%                | Las celdas tienen un color homogéneo (gris oscuro). No existe conexión visible entre las celdas.                            |

Tabla 2-11: Tecnologías de celdas

Se evidencia que la mejor eficiencia la presentan los módulos mono cristalinos, aunque los más utilizados son los poli cristalinos ya que son más baratos. Algunos fabricantes combinan estas tecnologías para desarrollar celdas híbridas, en las cuales se combinan la tecnología mono cristalina y poli cristalina para fabricar celdas que presentan mayor rendimiento en un amplio rango de temperaturas y espectros luminosos (mejora respecto a las mono cristalinas) y no presenta envejecimiento por la inducción de la luz (mejora respecto a las poli cristalinas).

Los módulos solares están compuestos de diferentes capas, las cuales se pueden observar en la Figura 2-29.

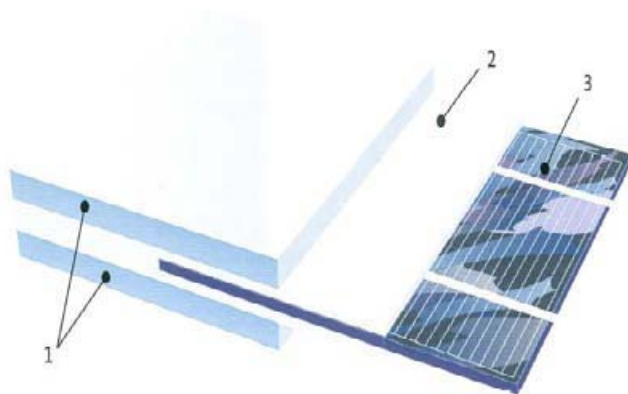


Figura 2-29: Detalle de celdas en Módulos Fotovoltaicos  
 1. Capa de Vidrio, 2. Encapsulante EVA y 3. Celdas Fotovoltaicas  
 Fuente: [45]

Se prefiere que estos componentes tengan características poco reflectivas respecto a la luz y con bajas pérdidas de transmisión de un lado a otro del material, esto principalmente en el vidrio frontal del panel. Debido a que se pretende que los paneles tengan una vida útil del orden de 25 años, son sellados en vacío con un encapsulante EVA que funciona como una goma para fijar las celdas al vidrio de frente y a la hoja *tedlar* o vidrio de la capa posterior, con vidrio en la parte de atrás se aumenta el peso del módulo prácticamente al doble.

Para completar el módulo se incluye un sello contra agua en los bordes del mismo entre el vidrio, la hoja *tedlar*; y el marco de aluminio. Además de estos componentes se encuentra la caja de conexiones que contiene los conectores para conectar el módulo fotovoltaico al resto de los elementos del sistema fotovoltaico (Figura 2-30).

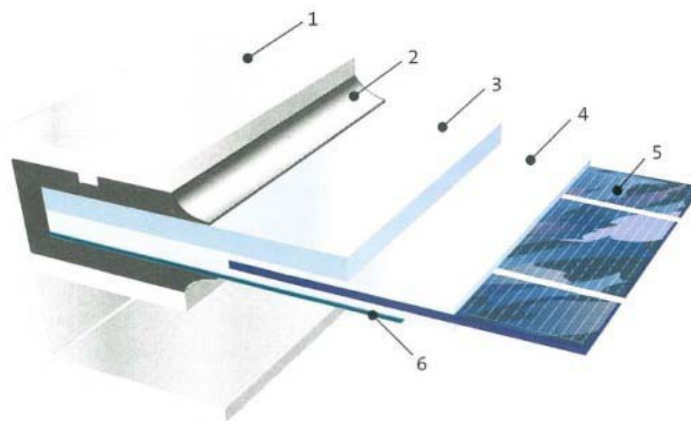


Figura 2-30: Módulo Fotovoltaico  
 1. Marco de aluminio, 2. Sello contra Agua, 3. Vidrio, 4. Encapsulante, 5. Celdas, 6. Hoja Tedlar [45]

## 2.6.2 Irradiancia solar

La generación de corriente en un módulo solar depende en forma directa de la irradiancia solar o sea depende de la medida de la radiación solar que cae sobre la superficie de las celdas que se mide en  $\text{W/m}^2$ , cuando aumenta la irradiancia se incrementa la intensidad de la corriente a través de las celdas.

El sol arroja en la capa superior de la atmósfera una irradiancia aproximada de  $1,350 \text{ W/m}^2$ , que cuando atraviesa la masa atmosférica pierde potencia llegando a la superficie terrestre la cantidad de  $1,000 \text{ W/m}^2$  aproximadamente. No se trata de una cota superior, ya que en muchas zonas la irradiancia supera los  $1000 \text{ W/m}^2$ . Este valor no es constante y varía hora a hora.

## 2.6.3 Tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito de una celda.

Antes de explicar el funcionamiento de una módulo fotovoltaico es necesario introducir dos conceptos eléctricos: tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito (Figura 2-31).

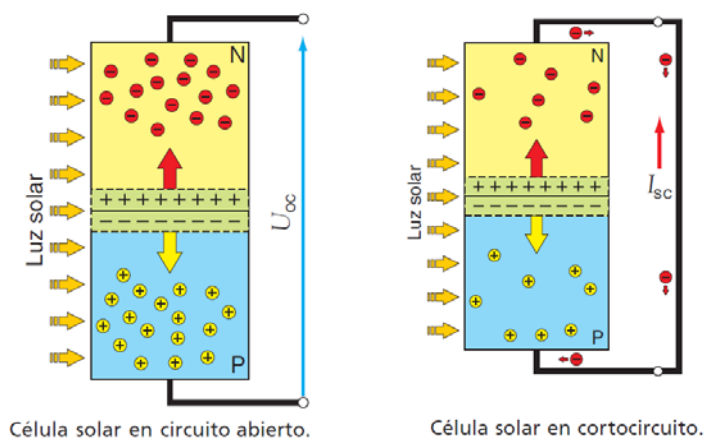


Figura 2-31: Tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito

Fuente: [46]

La tensión de circuito abierto  $V_{OC}$  (*open circuit*) es la diferencia de potencial que se alcanza cuando una celda fotovoltaica es iluminada sin estar conectadas las regiones P y N. Es el máximo valor de tensión de la celda sin estar conectada la carga, siendo proporcional a la iluminación recibida.

La corriente de cortocircuito  $I_{SC}$  (*short circuit*) es aquella que se genera cuando las regiones P y N están unidas por un conductor exterior con una resistencia nula y es proporcional a la iluminación recibida. Es el máximo valor de intensidad de la celda.

Una situación intermedia entre las dos imágenes de la Figura 2-31 sería un circuito donde las regiones P y N estuvieran unidas mediante un conductor y se encontrara una resistencia receptora. En tal caso, la tensión proporcionada por la celda se podría obtener mediante la ley de ohm ( $V_L = I_L \cdot R$ ). A mayor resistencia, el circuito se comportaría como un circuito abierto ( $R = \infty$ ,  $I = 0$ ), y con una muy pequeña se comportaría como si estuviera en cortocircuito ( $R = 0$ ,  $I = \infty$ ) [46].



### 2.6.4 Curva de Intensidad-Voltaje (I-V)

Todo módulo fotovoltaico tiene una curva de Intensidad-Voltaje (I-V), en la cual se puede observar su comportamiento y los valores de tensión e intensidad de salida cuando el módulo trabaja en condiciones ambientales estándar (STC, *Standard Test Conditions*): Irradiancia de  $1000\text{W/m}^2$ , temperatura de celda  $25^\circ\text{C}$  y velocidad del viento de  $1\text{ m/s}$ .

En la Figura 2-32 se ilustra una curva I-V, los Amperios o la Intensidad de Corriente (I) se representan en el eje de las ordenadas (vertical) y los Voltios o la Tensión (V) es en el eje de las abscisas (horizontal). La potencia disponible en un dispositivo fotovoltaico en cualquier punto a lo largo de la curva, es simplemente el producto de la corriente y la tensión en ese punto y se expresa en vatios (W).

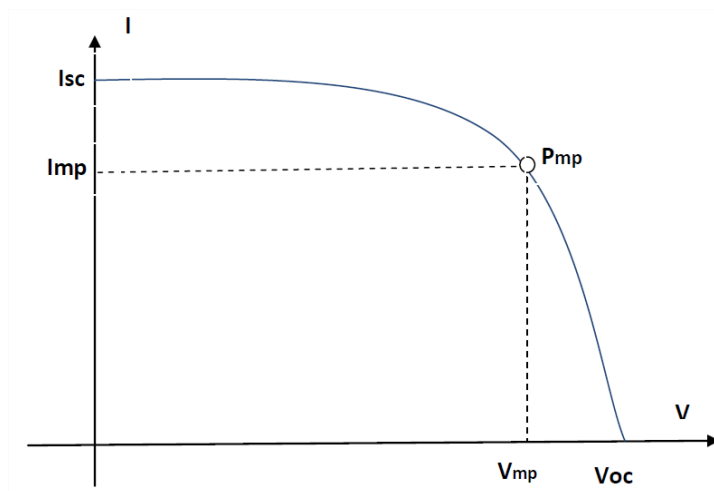


Figura 2-32: Curva de Intensidad-Voltaje (I-V)

A continuación, se explican las principales características del gráfico:

- Intensidad de cortocircuito ( $I_{cc}$  o  $I_{sc}$ ): es aquella que se produce cuando el panel se encuentra en cortocircuito a tensión  $0$  voltios. En el punto de “cortocircuito”, la potencia de salida es igual a cero, ya que la tensión es ‘cero’.
- Voltaje o tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$  o  $V_{oc}$ ): es la tensión máxima del panel, cuando la corriente es igual a cero, puesto que por un circuito abierto no circula corriente. En el punto de tensión de circuito abierto, la potencia de salida también es ‘cero’, pero esta vez se debe a que la corriente es ‘cero’.
- Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mp}$ ): es la corriente producida cuando la potencia es máxima
- Voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{mp}$ ): es la tensión producida cuando la potencia es máxima.
- Punto de Potencia Máxima ( $P_{mp}$  o  $P_{max}$ ), medida en vatios pico ( $W_p$ ): es la potencia máxima que puede suministrar el panel, es el punto donde el producto intensidad y tensión es máxima.  $W_p = V_{mp} \times I_{mp}$ .

## 2.6.5 Eficiencia del módulo fotovoltaico

La eficiencia de conversión ( $\eta$ ) o rendimiento, mide la cantidad de potencia de radiación incidente sobre el panel que es capaz de convertirse en potencia eléctrica. Se calcula con la siguiente expresión:

$$\eta = \text{Eficiencia} = \frac{W_p}{W_r}$$

Donde  $W_p$  es la potencia máxima que puede entregar el panel y  $W_r$  es la potencia de irradiación incidente sobre el panel solar (irradiación por  $m^2$  x área que ocupan las celdas en  $m^2$ ).

En la Tabla 2-12 se presenta un ejemplo de cálculo de eficiencia, que se calculó suponiendo condiciones de luz solar estándar en un día claro con una irradiación de 1,000 Watt de Energía Solar por metro cuadrado ( $1,000 \text{ W/m}^2$ ), temperatura de celda de  $25^\circ\text{C}$  y con un espectro de masa de aire de 1.5 (AM1.5).

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Panel                             | Jiawei 10W   |
| Open Circuit Voltaje (Voc)        | 21,9V  |
| Short Circuit Current (Isc)       | 0,65A  |
| Voltaje a máxima potencia (Vmp)   | 17,4V  |
| Corriente a máxima potencia (Imp) | 0,58A  |
| Potencia máxima (Wp)              | $V_{mp} \times I_{mp} = 17,4 \times 0,58 \approx 10\text{W}$       |
| Área de celda                     | 29,4 $\text{cm}^2$   |
| Número de Celdas                  | 36   |
| Área total de celdas              | $36 \times 29,4 = 1058,4\text{cm}^2 = 0,1058\text{m}^2$            |
| Potencia máxima (Wp)              | 10W  |
| Irradiación estándar              | $1000 \text{ W/m}^2$   |
| Potencia de radiación incidente   | $1000 \text{ W/m}^2 \times 0,1058 \text{ m}^2 = 105,8\text{W}$     |
| <b>Eficiencia</b>                 | <b><math>10\text{W}/105,8\text{W} = 0,095 \approx 9,5\%</math></b> |

Tabla 2-12: Eficiencia de un panel solar fotovoltaico

También se puede contemplar el tipo de celda solar, para ello se introduce un factor de forma (FF):

FF en las celdas cristalinas oscila de 0.70 a 0.85

FF en las celdas amorfas varían de 0.50 a 0.70

Factor de forma:

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Eficiencia:

$$\eta = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{sc}}{G \times Area}$$

**G:** irradiancia ( $\text{W/m}^2$ )

En el ejemplo:

$$FF = (17,4 \times 0,58) / (21,9 \times 0,65) = 10 / 14,23 = 0,70$$

$$\eta = (0,73 \times 21,9 \times 0,65) / (1000 \text{ W/m}^2 \times 0,1058 \text{ m}^2) = 9,96 / 105,8 = 0,094 = 9,4\%$$

### 2.6.6 Influencia de la radiación en la eficiencia del módulo

Como se dijo, la tensión y corriente que genera una celda depende directamente de la radiación recibida. La corriente de cortocircuito de la celda es directamente proporcional a la irradiancia (Figura 2-33), disminuyendo a medida que se reduce la irradiancia. La tensión de circuito abierto varía poco con la irradiancia, aunque también decrece, a efectos prácticos se puede considerar constante.

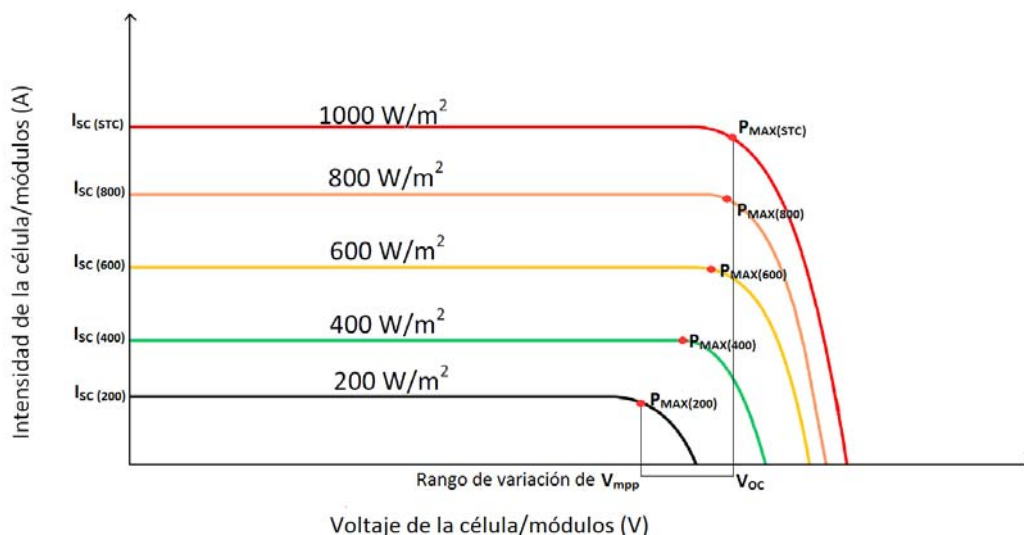


Figura 2-33: Curvas I-V para diferentes niveles de radiación

Fuente: [47]

La intensidad de cortocircuito,  $I_{SC}$ , varía con la irradiancia, siendo esta variación lineal acorde a la siguiente expresión:

$$I_{SC(G)} = G \times \frac{I_{SC(STC)}}{1000}$$

$I_{SC(G)}$ : intensidad de cortocircuito para una irradiancia  $G$  (Amperios)

$I_{SC(STC)}$ : intensidad de cortocircuito en condiciones estándar (Amperios)

$G$ : irradiancia ( $W/m^2$ )

### 2.6.7 Influencia de la temperatura en la eficiencia del módulo

La temperatura afecta a la tensión entregada por un módulo, tal y como muestra la Figura 2-34.

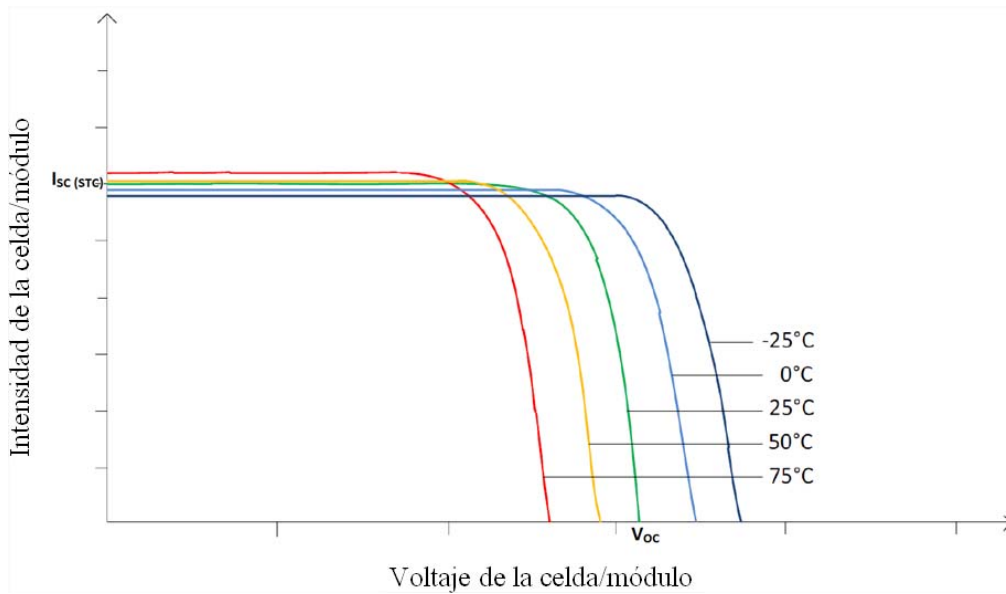


Figura 2-34: Curvas I-V para diferentes temperaturas  
Fuente: [47]

Como se aprecia la tensión de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura (aproximadamente  $-2.3\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ ). La intensidad de cortocircuito, sin embargo, aumenta cuando aumenta la temperatura, aunque la variación es muy pequeña y a efectos prácticos se considera constante.

Es evidente que si la tensión de la celda disminuye cuando aumenta la temperatura de la celda y la intensidad se mantiene constante, la potencia entregada por la celda disminuirá proporcionalmente (Figura 2-35).

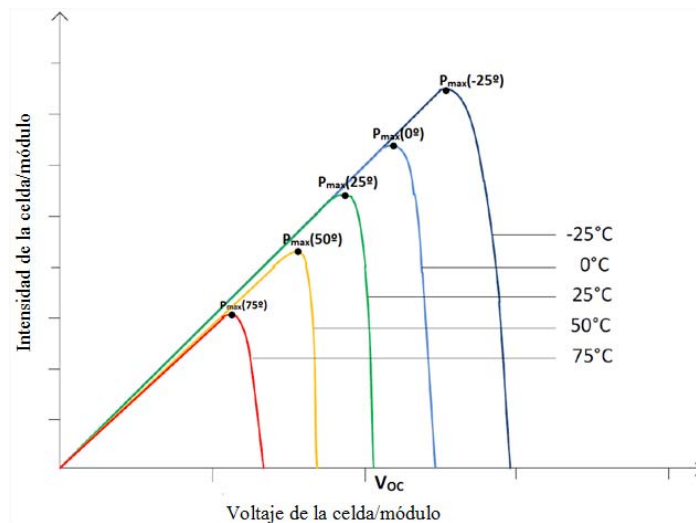


Figura 2-35: Curvas de potencia para diferentes temperaturas  
Fuente: [47]

La temperatura de trabajo de una celda está directamente relacionada con la temperatura ambiente y la irradiación y se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$T_c = T_a + G \times \frac{TONC - 20}{800}$$

Donde:

$T_c$ : Temperatura de trabajo de la celda (°C)

$T_a$ : Temperatura ambiente (°C)

TONC: Temperatura de Operación Nominal de la Celda (°C)

G: Irradiancia (W/m<sup>2</sup>)

El valor de la temperatura de operación nominal de la celda (TONC) es un parámetro que se obtiene de la ficha técnica del módulo fotovoltaico, toma valores que van de 43 a 49°C y si no se dispone de él se puede tomar 45°C como un valor razonable.

TONC o NOCT “Nominal Operating Cell Temperature” corresponden a una irradiancia en el plano del módulo de 800 W/m<sup>2</sup>, con orientación normal a la radiación incidente al mediodía solar, temperatura ambiente de 20°C, velocidad del viento de 1 m/s y funcionamiento en circuito abierto.

La Figura 2-36 resume el comportamiento de las variables ante cambios de temperatura, se observa que a mayor temperatura, menor tensión de circuito abierto (Voc), menor potencia máxima generada (Pmax) y mayor intensidad de cortocircuito (Isc).

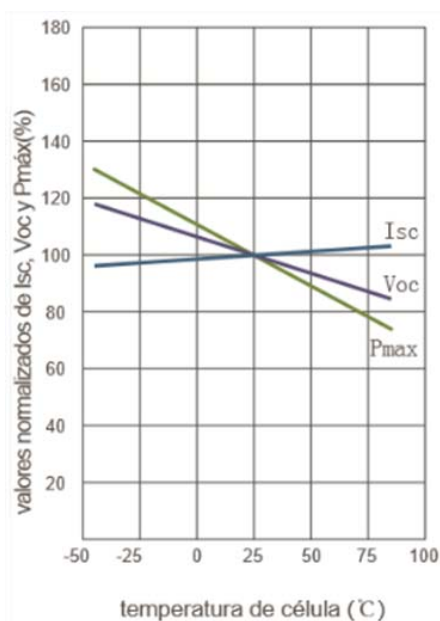


Figura 2-36: coeficiente de temperatura según Isc,  
Voc y Pmax  
Fuente: [47]

Estas variaciones respecto a la temperatura se expresan mediante los coeficientes intensidad-temperatura ( $\alpha$ ) y tensión-temperatura ( $\beta$ ):

- Coeficiente intensidad-temperatura ( $\alpha$ ): variación de la intensidad de cortocircuito de un módulo fotovoltaico por grado centígrado de variación de la temperatura de sus celdas. Se especifica en valor absoluto en mA/°C o en valor relativo como %/°C. Un valor típico de  $\alpha$  es 0,63 mA/°C.

- Coeficiente tensión-temperatura ( $\beta$ ): variación de la tensión de circuito abierto de un módulo fotovoltaico por grado centígrado de variación de la temperatura de sus celdas. Se especifica en valor absoluto en mV/°C o en valor relativo como %/°C. Un valor típico de  $\beta$  es -2,3 mV/°C.

Estos valores son utilizados de forma general para celdas de silicio, pueden variar si se utilizan otro tipo de celdas.

La variación de corriente y tensión para un panel fotovoltaico se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$\Delta I = vtemp \times (0,63mA \times \text{filas}_{\text{paralelo}})$$

$$\Delta V = vtemp \times (-2,3mV \times \text{celdas}_{\text{serie}})$$

Donde, vtemp es la variación de temperatura de operación de las celdas,  $\text{filas}_{\text{paralelo}}$  es la cantidad de filas en paralelo que tiene el panel y  $\text{celdas}_{\text{serie}}$  la cantidad de celdas en serie por fila.

Incidencia de la temperatura en la potencia (Figura 2-37):

$$P_i = I_i \times V_i \text{ (Potencia entregada en la hora i)}$$

$$P_{i+1} = (I_i + \Delta I) \times (V_i + \Delta V) \text{ (Potencia esperada para la hora i+1)}$$

$$\Delta P = P_{i+1} - P_i$$

$$iP = \frac{\Delta P}{P_i}$$

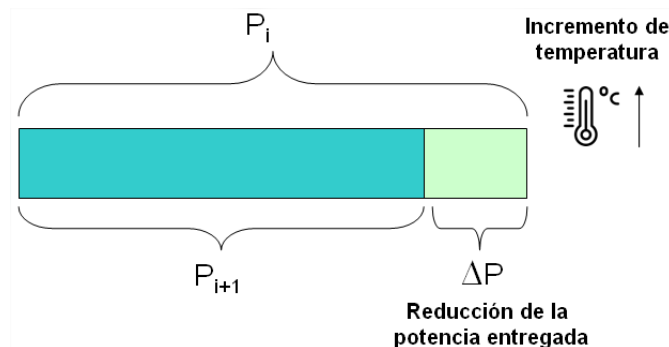


Figura 2-37: Incidencia de la temperatura en la potencia entregada por un panel

Ejemplo: Se realiza un cálculo, con un cambio brusco de temperatura (5 a 22 °C), para mostrar la incidencia de la temperatura en la potencia entregada por el panel.

Radiación a la hora 12:  $r_{12} = 500W/m^2$

Radiación a la hora 13:  $r_{13} = 850W/m^2$

Corriente que entrega el panel a la hora 12:  $I = 1,05$

Tensión que entrega el panel a la hora 12:  $V = 4,78$

Temperatura ambiente a las 12: 5 °C

Temperatura ambiente a las 13: 22 °C

Temperatura de operación nominal:  $TONC = 45\text{ °C}$

Potencia máxima que entrega el panel:  $P_{\text{max}} = 10W$

Celdas del panel: 36. 3 Filas en paralelo y 12 celdas en serie por fila.

Calculo de la temperatura de celda:

$$T_{c_{12}} = T_{a_{12}} + r_{12} \times \frac{TONC - 20}{800} = 5 + (500 \times \frac{45 - 20}{800}) = 20,6$$

$$T_{c_{13}} = T_{a_{13}} + r_{13} \times \frac{TONC - 20}{800} = 22 + (850 \times \frac{45 - 20}{800}) = 48,5$$

Variación de temperatura de operación de celda para la hora i=13:

$$vtemp_{13} = tc_{13} - tc_{12} = 48,5 - 20,6 = 27,9^\circ C$$

Variación de la corriente:

$$\Delta I_{13} = vtemp_{13} \times (0,63mA \times filas_{paralelo}) = 27,9 \times 0,63 \times 3 = 52,80mA = 0,05A$$

Variación de la tensión:

$$\Delta V_{13} = vtemp_{13} \times (-2,3mV \times celdas_{serie}) = 27,9 \times -2,3mV \times 12 = -771,075mV = -0,77V$$

Incidencia de la temperatura en la potencia:

$$P_{12} = I \times V = 1,05A \times 4,78V = 5,02W \text{ (Potencia entregada a las 12)}$$

$$P_{13} = (I + \Delta I) \times (V + \Delta V) = (1,05 + 0,05) \times (4,78 - 0,77) = 4,41W \text{ (Potencia esperada a las 13)}$$

$$\Delta P = p_{i+1} - p_i = 4,41 - 5,02 = -0,6W$$

$$iP = \frac{\Delta P_{12-13}}{P_{12}} = \frac{-0,6}{5,02} = -0,12 = -12\%$$

En el ejemplo una variación de 400% en la temperatura (5 a 22°) generó una reducción del 12% en la potencia. En general, cuando se utilizan paneles con una cantidad reducida de celdas, la incidencia de la temperatura en la potencia entregada es muy baja.

## 2.6.8 Hora Solar Pico

La irradiancia solar varía en cada lugar y en cada momento, razón por la cual las unidades de irradiancia son presentadas por los fabricantes en términos de Hora Solar Pico (HSP). Se denomina HSP al número de horas diarias que, con una irradiancia solar ideal de 1000 W/m<sup>2</sup> proporciona la misma irradiación solar total de ese día. Este concepto se explica gráficamente en la Figura 2-38.

Las horas sol pico ayudan a determinar la energía disponible, multiplicando HSP por la potencia que el panel fotovoltaico entrega. Se obtiene así la energía que proporciona el panel (sin considerar las pérdidas por conductividad, que suelen ser de un 2%).

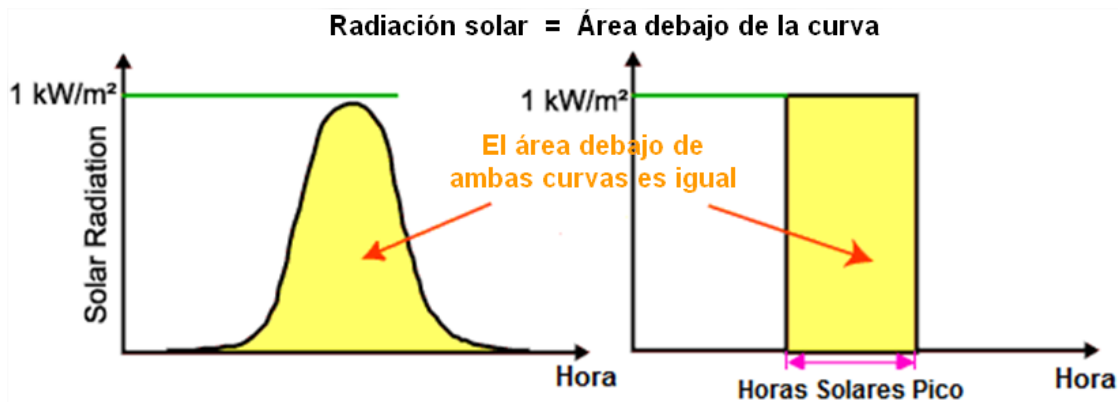


Figura 2-38: Hora Solar Pico (HSP)

### 2.6.9 Mapas solares

Las HSP de una ubicación geográfica o zona de interés se pueden obtener desde un mapa solar. Son diversas las entidades u organismos que miden o calculan la radiación solar y publican los resultados, en forma de atlas o bases de datos para cada mes del año. A continuación se mencionan los más utilizados en la Argentina y a nivel mundial:

- Atlas de Radiación Solar de la República Argentina de Hugo Grossi Gallegos, en el que se presenta un conjunto de cartas con la distribución mensual de los promedios diarios de la irradiación solar global y de las horas de brillo solar.  
<http://www.gersol.unlu.edu.ar/>.
- Mapa de Radiación Solar del Servicio Meteorológico Nacional.  
<https://datos.gob.ar/dataset/smn-radiacion-solar>
- Sistema de Información Solar Salta (SISOL) [48]. Es un Sistema de Información Web de consulta espacial y temporal de datos de radiación solar y temperatura que permite realizar evaluaciones técnico-financieras de sistemas solares (paneles fotovoltaicos y calefones solares) en la Provincia de Salta.  
<http://sisol.salta.gob.ar/>
- Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project. Conjuntos de datos solares y meteorológicos, que surgen de investigaciones de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) para fomentar el uso de las energías renovables y promover la eficiencia energética a nivel mundial.  
<https://power.larc.nasa.gov/>
- Atlas mundial de recursos de energía solar del Banco Mundial. Se trata de una herramienta que permite observar con gran detalle lugares en todo el mundo (la resolución es de 1 kilómetro), y ofrece mapas descargables de todos los países.  
<https://globalsolaratlas.info/>

Se recomienda utilizar una sola base de datos para evitar divergencias en los resultados. En esta tesis se utilizó la base de datos de SISOL [48], que, no siendo la más exacta, contiene los datos de radiación de la provincia de Salta actualizados con elevada frecuencia.

Ejemplo de uso de un mapa solar y las HSP:



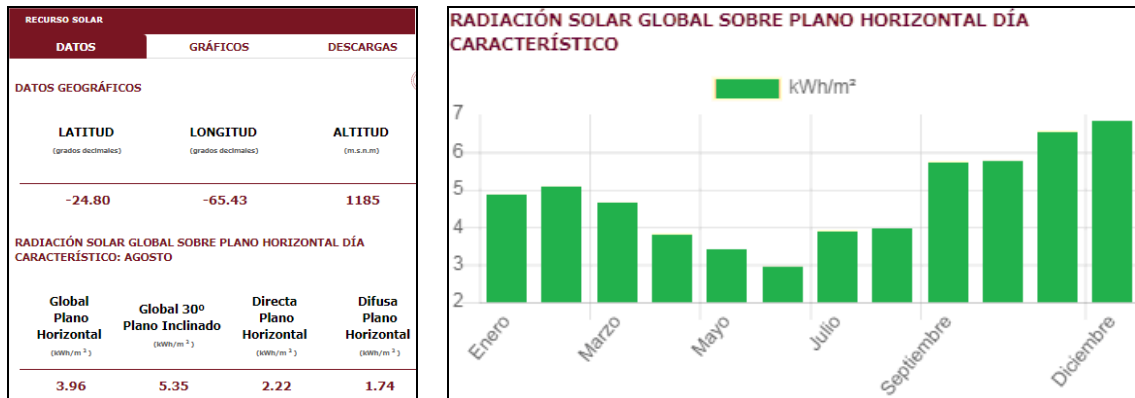


Figura 2-39: Radiación solar para Salta Capital  
Fuente: SISOL [48]

SISOL informa para el mes de agosto en salta Capital (Figura 2-39): 3,96 kWh/m<sup>2</sup>

$$\text{Horas Solares Pico: } HSP = \frac{3,96 \text{ kWh/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} = 3,96 \text{ horas}$$

Potencia máxima (Wp) que entrega el panel: 10W

$$\text{Energía} = 10 \text{ W} \times 3,96 \text{ h} = 39,6 \text{ Wh}$$

Esto indica que un día típico de Agosto el panel debería entregar aproximadamente 39,6Wh en el transcurso del día (sin considerar pérdidas). Para corroborar esto se realizaron mediciones de la potencia entregada por el panel un día de Agosto. El día estuvo claro fresco y soleado y la temperatura máxima observada fue de 15°C. En la Tabla 2-13 se presenta el resumen de las mediciones realizadas, para cada hora del día se indica el promedio de las siguientes magnitudes: Radiación solar (medida con un Kipp&Zonn CM3, sobre plano horizontal), potencia de radiación incidente (en la superficie del panel); asimismo la potencia entregada por el panel.

| Franja Horaria | Irradiación W/m <sup>2</sup> | Energía media recibida (Wh) | Energía entregada (Wh) |
|----------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 09 - 10        | 95                           | 10,1                        | 0,9                    |
| 10 - 11        | 180                          | 19,0                        | 1,8                    |
| 11 - 12        | 435                          | 46,0                        | 4,3                    |
| 12 - 13        | 716                          | 75,8                        | 7,2                    |
| 13 - 14        | 940                          | 99,5                        | 9,4                    |
| 14 - 15        | 752                          | 79,6                        | 7,5                    |
| 15 - 16        | 495                          | 52,4                        | 5,0                    |
| 16 - 17        | 254                          | 26,9                        | 2,5                    |
| 17 - 18        | 105                          | 11,1                        | 1,1                    |
| <b>TOTAL</b>   | <b>3972</b>                  | <b>420,4</b>                | <b>40,1</b>            |

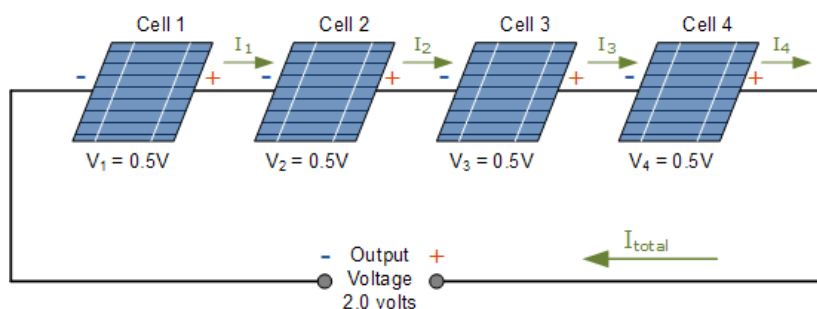
Tabla 2-13: Mediciones realizadas sobre un panel fotovoltaico

Se observa que el panel entregó un total de 40,1Wh de energía en el transcurso del día, muy cercano al valor estimado: 39,6 Wh.

## 2.6.10 Conexión de las celdas solares

En un módulo fotovoltaico las celdas solares se pueden conectar de tres formas: en serie, en paralelo, o bien de forma combinada serie y paralelo. La corriente y el voltaje se modificarán de acuerdo al número de celdas conectadas en serie/paralelo.

Las celdas se conectan en serie para incrementar la tensión, el voltaje de salida de las celdas conectadas en serie está dado por la suma de los voltajes generados por cada celda. En la Figura 2-40 se ilustra un sistema fotovoltaico de 4 celdas conectadas en serie, donde cada celda es capaz de entregar un voltaje de 0,5 V y una corriente de 1 A. Se observa que la conexión de las celdas en serie entrega 2 V y una corriente igual a 1 A



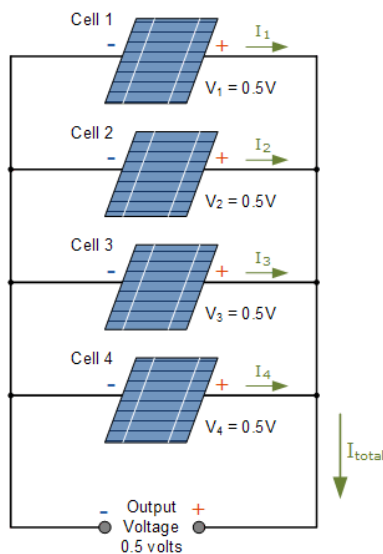
### CELDA CONECTADAS EN SERIE

$$\text{Voltaje} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

$$\text{Corriente} = I_1 = I_2 = I_3 = I_4$$

Figura 2-40: Conexión de celdas en serie

Las celdas se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas más grandes, el voltaje del conjunto es el mismo que el de una celda; mientras que la corriente de salida, es la suma de cada unidad conectada en paralelo. En la Figura 2-41 se modifica el sistema fotovoltaico conectando las celdas en paralelo, se observa que con esta configuración el módulo entrega una corriente de 4A y un voltaje de 0,5 V.



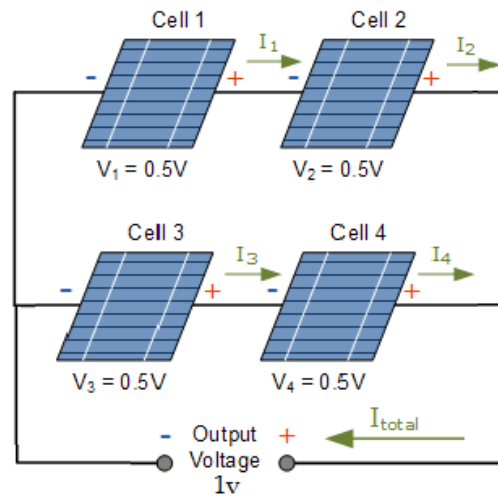
### CELDA CONECTADAS EN PARALELO

$$V_{tot} = V_1 = V_2 = V_3 = V_4$$

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

Figura 2-41: Conexión de celdas en paralelo

Se pueden combinar conexiones de celdas en serie y paralelo para ajustar las características eléctricas del módulo fotovoltaico a requerimientos energéticos específicos (optimizando la potencia entregada). En la Figura 2-42 se ilustra una configuración mixta, 2 filas de celdas en paralelo cada una con 2 celdas en serie (2x2). Esta configuración entrega una corriente de 2A y un voltaje de 1V.



CELDA CONECTADAS EN SERIE Y PARALELO

$$\text{Voltaje} = V_1 + V_2 = V_3 + V_4 = 1V$$

$$\text{Corriente} = I_1 + I_2 = I_3 + I_4 = 2A$$

Figura 2-42: Conexión mixta, en serie y paralelo.

## 2.7 Recarga de dispositivos móviles basada en energía solar fotovoltaica

La energía solar puede ser aprovechada para recargar dispositivos móviles utilizando mini sistemas fotovoltaicos o pico sistemas fotovoltaicos. Estos sistemas, generalmente llamados cargadores solares portátiles, disponen de un pequeño panel que transforma la radiación solar en corriente eléctrica, la cual es utilizada para acumular energía en una batería interna. Cuando se requiere energía para el funcionamiento de un dispositivo, se conecta este equipo al cargador y se transfiere carga, ya sea en forma directa cuando el panel recibe luz solar, o indirecta cuando el cargador no recibe luz solar y utiliza la energía almacenada en su batería (Figura 2-43).

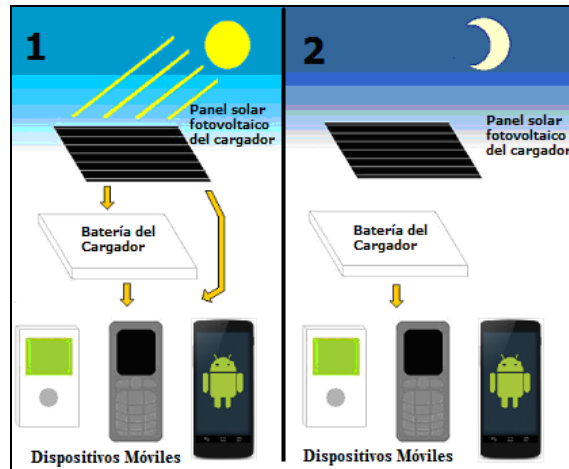


Figura 2-43: Cargadores solares con y sin batería

Gracias a su tamaño y peso reducido es muy sencillo transportarlos y usarlos en zonas alejadas de la red eléctrica, o bien cuando se esté en movimiento y no sea posible permanecer en un lugar fijo durante varias horas para recargar un dispositivo.

La mayoría de estos cargadores permiten también conectarlos a la red eléctrica para recargar su batería interna. También se encuentran diseños de sistemas portátiles con la capacidad de cargar sus baterías internas obteniendo energía desde diferentes fuentes: USB, Corriente alterna o continua, Inalámbrica y Energía solar (Figura 2-44).

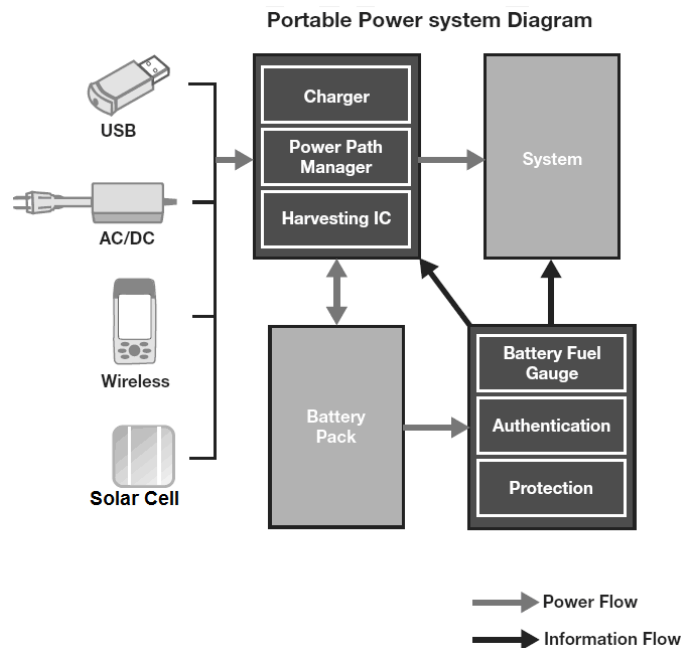


Figura 2-44: Sistema portable de energía

Fuente: [49]

Para evitar dañar la batería del dispositivo móvil al realizar la carga, es necesario utilizar un regulador de carga, siguiendo el esquema de la Figura 2-45.



Figura 2-45: Uso de reguladores de carga

Un regulador de carga es un circuito encargado de dirigir y controlar la cantidad de energía que fluye entre el cargador solar y la batería del dispositivo. Recibe una cantidad de tensión determinada y es capaz de entregar una cantidad menor y acondicionada para un equipo determinado, toda la tensión excedente suministrada por la fuente será absorbida por el regulador y disipada como calor. Además, controla constantemente el estado de carga de la batería y regula la intensidad de carga para evitar que se produzcan sobrecargas.

Existen una gran variedad de reguladores en el mercado, la mayoría de los fabricantes utiliza el circuito integrado LM2596 [50], que presenta las siguientes características técnicas:

Voltaje de salida: 1.23V ~ 35V DC Ajustable  
 Voltaje de entrada: 4.0V ~ 40V DC  
 Corriente de salida: máx. 3A, 2.5A recomendado  
 Eficiencia de conversión: 92%  
 Temperatura de operación: -40°C a +85°C

### 2.7.1 Uso de cargadores solares portátiles

El uso de cargadores solares portátiles para la recarga de dispositivos móviles está ampliamente difundido, a continuación se mencionan algunos de los estudios realizados.

En [51] se presenta el diseño de un cargador solar portátil para dispositivos móviles de bajo consumo energético, en el diseño se especifica el uso de un número reducido de componentes, lo que hace que el cargador sea económicamente viable además de ser altamente portátil.

En [52] se efectúa una revisión de las diferentes técnicas de adquisición de energía solar para alimentar dispositivos portátiles en forma limpia y sustentable. Se realiza un estudio para mejorar el rendimiento de una celda solar, mostrando algunos experimentos prácticos

realizados en América del Sur. Además, se analizan algunas implementaciones de cargadores solares para dispositivos portátiles, mostrando los beneficios e inconvenientes de cada arquitectura. Finalmente, se propone una solución completa e integrada para el uso de energía solar fotovoltaica en la recarga de baterías de dispositivos portátiles.

En [53] se presentan estrategias de adquisición de energía solar para la recarga de teléfonos celulares. Se establecen guías de diseño y construcción de cargadores solares que interactúan con el dispositivo móvil, posibilitando la optimización de la carga en función de los requerimientos de energía del dispositivo y la activación de mecanismos de ahorro de energía en el dispositivo cuando el cargador se encuentre en condiciones desfavorables para la adquisición de energía.

En el trabajo experimental de esta tesis se utilizaron pico sistemas fotovoltaicos sin hacer uso de baterías internas, por lo que la energía generada por el panel se transfiere directamente a la batería del dispositivo. De esta manera, se evita la contaminación producida por el uso de baterías externas y se reduce el costo de fabricación.

## Capítulo 3: Aspectos Metodológicos

### 3.1 Descripción

#### 3.1.1 Selección del ámbito de trabajo

Se optó por desarrollar el trabajo experimental en escuelas rurales aisladas debido a que estas instituciones son representativas de la comunidad y constituyen un ámbito ideal para el desarrollo de la investigación.

Cabe destacar que la escuela en el medio rural constituye no solo una institución educativa, sino también un centro social e instructivo para los habitantes de la zona. Esto se debe a una valoración muy positiva de la escuela por parte de las familias y las comunidades, las relaciones de proximidad y de inserción significativa en el medio local, y un trabajo escolar de niños y niñas, de profesores e incluso de padres y madres, que las circunstancias de aislamiento ayudan a promover.

Al constituirse como único edificio estatal o provincial en la zona es utilizado para reuniones afines a los intereses de la comunidad que es poca y dispersa, como por ejemplo casos de extravíos de personas o enfermedades de adultos mayores, ya que es su manera de afrontar problemas ante la falta total de accesibilidad inmediata a asistencia en salud o necesidades básicas.

Para resaltar la importancia de la escuela rural aislada, en la Figura 3-1 se muestra una imagen de la Escuela de Molulo en la Provincia de Jujuy, la misma se encuentra en una zona completamente aislada. Es el único lugar de la región que cuenta con Sistemas Fotovoltaicos que permiten suministrar energía eléctrica a los pobladores, que llegan caminando desde parajes alejados y permanecen por varias horas en la escuela mientras se cargan las baterías de sus celulares.



Figura 3-1: Escuela N° 76 de Molulo

Se seleccionaron las siguientes escuelas, utilizando como referencia el mapa educativo de las provincias de la argentina [54] :

| <b>Escuela</b> | <b>Localidad</b>       | <b>Provincia</b>    |
|----------------|------------------------|---------------------|
| Nº 4526        | El Rosal               | Salta               |
| Nº 4422        | Potrero de Chañi       | Salta               |
| Nº 4405        | Las Juntas - Guachipas | Salta               |
| Nº 4698        | Cerro negro            | Salta               |
| Nº 4756        | El Palomar             | Salta               |
| Nº 89          | Yala de Monte Carmelo  | Jujuy               |
| Nº 130         | Calilegua              | Jujuy               |
| Nº 76          | Molulo                 | Jujuy               |
| Nº 348         | Pozo Nuevo             | Santiago del Estero |
| Nº 19          | San Pedro de Guasayan  | Santiago del Estero |

Tabla 3-1: Escuelas rurales aisladas del NOA

Para la selección de las escuelas, se consideraron los siguientes aspectos:

- La zona donde se encuentra ubicada la escuela:  
Presenta condiciones de aislamiento geográfico y dificultades de acceso.  
Dispone de cobertura mínima de red celular (2G/EDGE).  
Cuenta con una elevada radiación solar en el transcurso del año.  
No está conectada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
- La escuela representa a una comunidad rural dispersa.
- La escuela cuenta con espacio físico para realizar las pruebas de campo.
- Los docentes y alumnos de la escuela tienen conocimientos mínimos de uso de dispositivos móviles.
- Se dispone de autorización para trabajar en la escuela.
- Disponibilidad de tiempo y buena predisposición por parte de maestros y alumnos para colaborar con el trabajo experimental.
- Equipamiento preexistente en la escuela. Dispositivos móviles (de alumnos y maestros) y sistemas fotovoltaicos instalados.

En cada escuela seleccionada se realizaron las siguientes actividades:

- Contacto preliminar con el director del establecimiento, explicación de las tareas a realizar y gestión de la autorización de ingreso a la escuela.
- Se realizaron dos visitas a la escuela, debido a las distancias y a las dificultades de acceso, las visitas fueron de 2 días como mínimo, la escuela proporcionó alojamiento y comida al tesista y a sus colaboradores. En la primera visita, se efectuó un relevamiento general y una capacitación a los maestros. Mientras que en la segunda, se llevó adelante el trabajo experimental con la participación de maestros, alumnos y padres de familia, y la colaboración de estudiantes avanzados de la Licenciatura en Sistemas de la Universidad Nacional de Salta. Para llegar a la escuela se utilizó un vehículo 4x4 por ruta provincial de ripio y en algunos casos el tramo final se hizo caminando algunos kilómetros por sendero, portando el equipamiento.



### 3.1.2 Medición del consumo

Para realizar las mediciones y caracterizar el consumo se eligió la herramienta de software Trepn Profiler [55], fundamentando esta elección en los siguientes motivos:

- Es de libre distribución y descarga gratuita desde la página Web de Qualcomm [23].
- Está desarrollada para Sistema Operativo Android, según datos de Our Mobile Planet de Google [56] Android es el SO más utilizado en dispositivos móviles en Argentina.
- Se puede ejecutar en dispositivos de gama baja (Snapdragon serie 4), media (Snapdragon serie 6) y alta (Snapdragon serie 8).
- Realiza mediciones con mucha precisión ya que utiliza sensores incorporados en el dispositivo (*sensor-based*), que permiten determinar el consumo de energía en tiempo real, por aplicación y por componente de hardware (*fine grained*).
- Genera un archivo de salida con trazas de ejecución. Esto permite ejecutar una secuencia de pruebas en el dispositivo mientras Trepn se ejecuta en segundo plano, una vez finalizadas las pruebas se analizan los resultados almacenados en los archivos de salida.

En la Figura 3-2 se ilustran los pasos necesarios para efectuar una medición de consumo con Trepn Profiler, los mismos se explican a continuación:

- Seleccionar escenario y caso de prueba. Se selecciona un escenario de comunicación a internet (Ej.: Red celular) y la prueba a realizar (Ej.: Navegación Web con la aplicación Chrome).
- Configurar dispositivos. Se desinstalan las aplicaciones no utilizadas, se detienen procesos en segundo plano, se deshabilitan los dispositivos de hardware que no se necesitan para las pruebas, se desactivan radios de comunicación no utilizados, se deshabilitan las actualizaciones automáticas de sistema y de Google Play.
- Ejecutar la aplicación Trepn Profiler y arrancar el monitoreo de consumo de energía. Seleccionar la aplicación a monitorear, la elegida para realizar la prueba (Ej.: Chrome).
- Ejecutar el caso de prueba
- Al finalizar la prueba, detener Trepn Profiler y guardar la traza de ejecución generada (Formato CSV).
- Analizar y procesar la traza de ejecución generada por el profiler para determinar la energía consumida al ejecutar el caso de prueba.

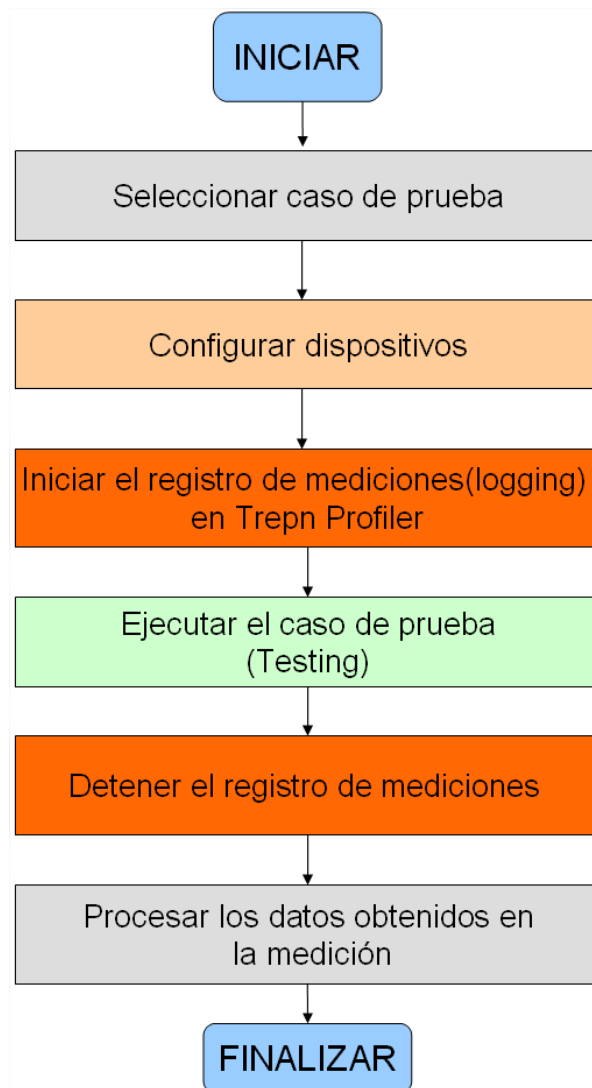


Figura 3-2: Diagrama de flujo del procedimiento de medición

### 3.1.3 Metodología para deducir el modelo de consumo.

La construcción del modelo (Figura 3-3) involucra los siguientes pasos:

- Definición de los parámetros que impactan en el consumo de energía en zonas rurales, se eligieron los siguientes: Nivel de interacción de la tarea, Capacidad del usuario para manejar el dispositivo, Gama del dispositivo y Nivel de brillo del dispositivo.
- Relevamiento de tareas de uso frecuente en zona rural. Se realizan entrevistas a pobladores de la zona y se construye la lista de tareas.
- Selección de aplicaciones móviles para ejecutar las tareas. Se ejecuta la tarea utilizando diferentes aplicaciones móviles, se mide cuánta energía consume cada aplicación para ejecutar la tarea (aplicando el procedimiento de 3.1.2) y se selecciona la aplicación que consuma menos energía (eficiencia energética). Ejemplo:

Tarea: Navegación WEB en modo consulta

Aplicaciones móviles: Chrome, Firefox, Opera

Aplicación de menor consumo para realizar la tarea: Chrome

- Diseño de casos de prueba. Se definen cuestiones como: que tarea se va a ejecutar en la prueba, con que aplicación móvil, en que dispositivo, que valores tendrán los parámetros y quien (usuario) la ejecutará.
- Ejecución de los casos de prueba. Se utiliza el procedimiento especificado en el apartado 3.1.2 para estimar la cantidad de energía consumida al ejecutar cada caso de prueba.
- Construcción del modelo de energía requerida. Los resultados de las estimaciones de consumo energético (de los casos de prueba) se utilizan para construir/ajustar el modelo de consumo de energía.
- Validación del modelo. Se comparan los resultados obtenidos en las estimaciones de consumo, con valores medidos utilizando hardware específico (Multímetro). Para considerar los desvíos, se incluyó una variable de margen de error en el modelo.

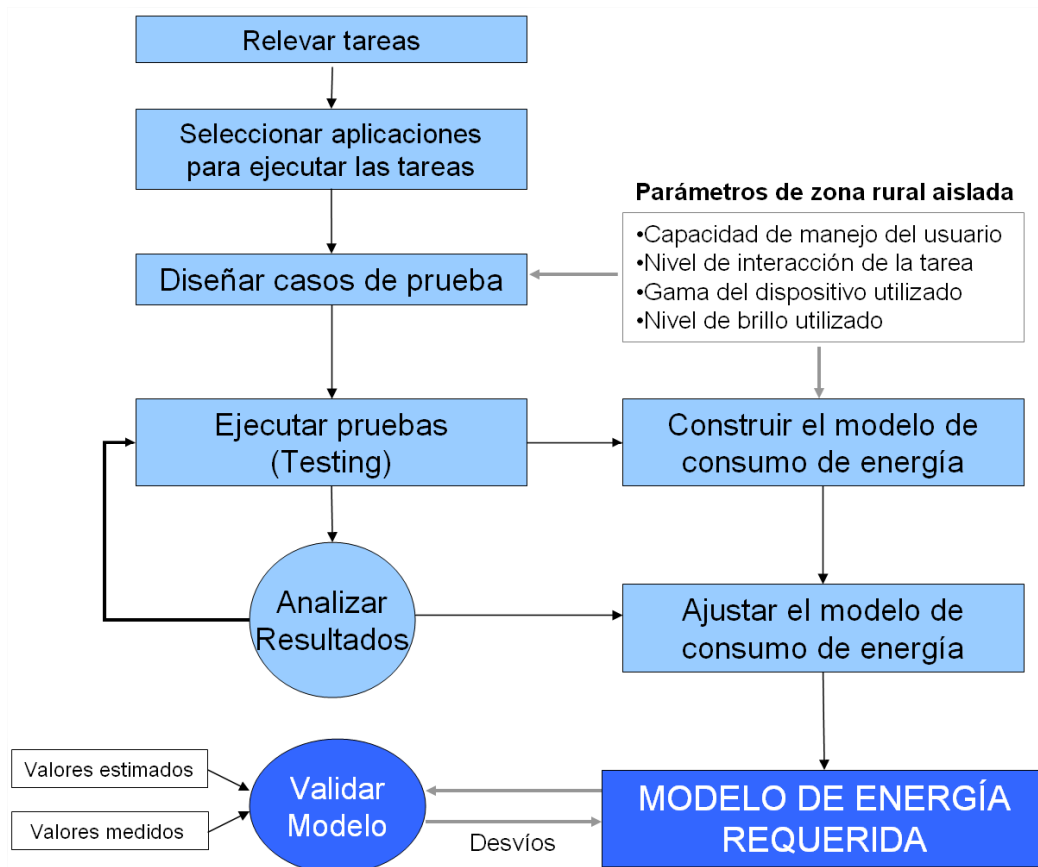


Figura 3-3: Construcción del modelo de consumo

### 3.1.4 Metodología para construir el modelo de energía disponible.

La construcción del modelo (Figura 3-4) involucra los siguientes pasos:

- Selección de un panel fotovoltaico. Seleccionar un panel de tamaño y peso reducido para facilitar su utilización en zonas aisladas.
- Definición de las características técnicas del panel. Entre otras: potencia máxima, tensión a corto circuito, corriente a corto circuito, curva I-V.
- Medición. Se instala el panel en plano horizontal en la zona de interés, utilizando un multímetro, se mide y se registra la corriente y tensión entregada por el panel en diferentes horas del día solar. La medición se debe realizar en un día claro y soleado para mejorar la incidencia de la radiación solar.
- Utilizando un multímetro, se mide la corriente y tensión entregada por el panel en diferentes horas del día solar, en la zona de interés. Estos valores irán cambiando en función de la radiación solar. La medición se debe hacer en un día claro y soleado para mejorar la incidencia de la radiación.
- Construcción del modelo de energía disponible. Las mediciones registradas son procesadas y analizadas, los resultados del análisis se utilizan para construir un modelo de energía disponible (por hora). De ser necesario, se realizan nuevas mediciones para ajustar el modelo.
- Validación del modelo. Se comparan los resultados obtenidos en las mediciones, con los valores de un mapa solar con datos de la zona de interés.

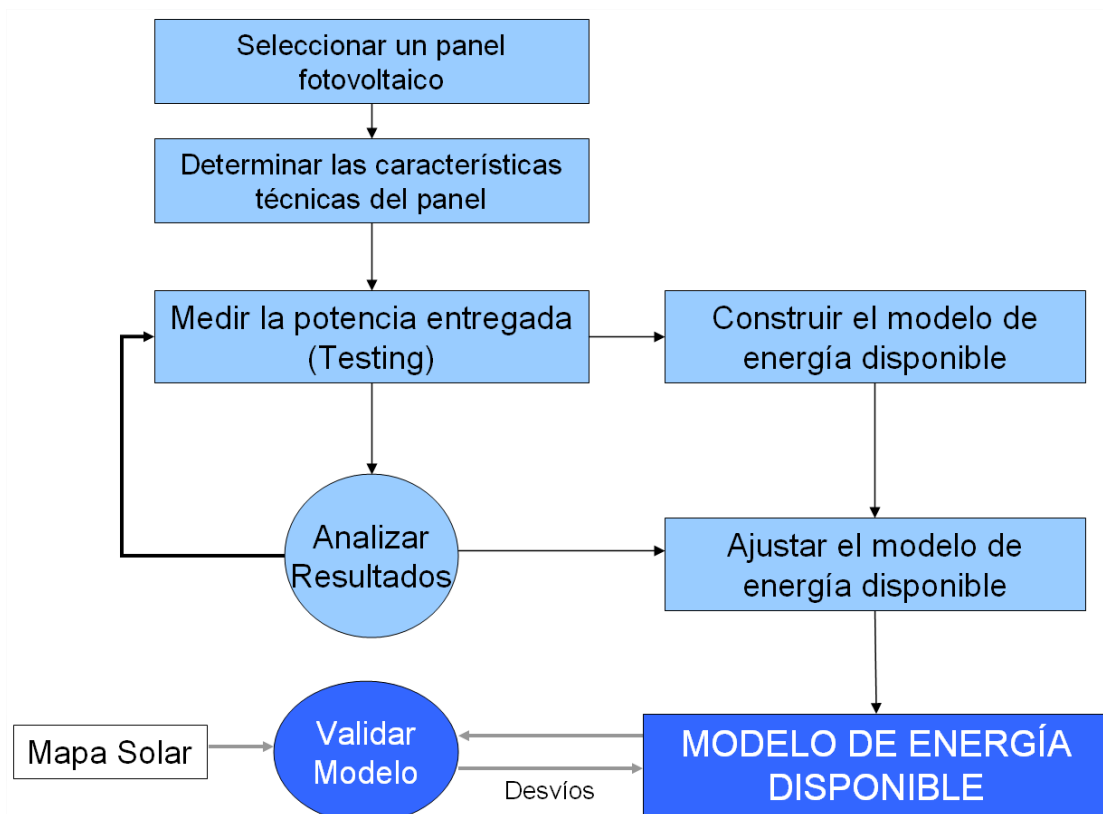


Figura 3-4: Construcción del modelo de energía disponible

## 3.2 Aplicación

Los aspectos metodológicos presentados en el apartado anterior, se utilizaron para realizar un estudio proyectivo <sup>2</sup> que pretende dar solución a las siguientes carencias de las poblaciones rurales aisladas: Imposibilidad de acceso a la información mediada por dispositivos móviles y falta de equipamiento basado en energías renovables que garantice el uso continuo de los mismos.

Para subsanar las carencias detectadas, cumpliendo con los objetivos de la investigación, se desarrollaron las siguientes actividades:

1. Selección del ámbito de trabajo. Se seleccionaron zonas rurales aisladas para realizar el trabajo experimental utilizando los criterios expuestos en el apartado 3.1.
2. Definición de aspectos tecnológicos:
  - Equipamiento a utilizar: Dispositivos móviles, baterías, paneles solares fotovoltaicos, sensores y placas de control.
  - Técnicas y equipamiento para medir el consumo de energía en los dispositivos móviles.
  - Métricas a utilizar para medir el rendimiento en los dispositivos móviles.
  - Tecnologías de comunicación a utilizar. Redes móviles. Conexión directa a la red celular. WPAN Bluetooth o Wifi en modo ad hoc.
3. Especificación de procedimientos para caracterizar y reducir el consumo de energía en un dispositivo móvil.
4. Selección de estrategias de despliegue de redes móviles que reduzcan el consumo y optimicen el uso de la energía.
5. Deducción de un modelo de consumo de energía, teniendo como premisa la reducción del consumo de energía en los dispositivos para posibilitar el aprovechamiento de la energía solar. Se aplicó la metodología del apartado 3.1.3
6. Elaboración de un modelo de energía disponible, aplicando la metodología presentada en el apartado 3.1.4.
7. Vinculación de los modelos de energía de consumo y de energía disponible.
8. Construcción de un prototipo para medición y una aplicación móvil que faciliten el uso de los modelos desarrollados en regiones aisladas.
9. Optimización de la potencia entregada por los paneles fotovoltaicos para la recarga de baterías de dispositivos móviles. Se modificaron el número y la organización de las celdas de un panel para ajustar la corriente y tensión entregada por el mismo a los requerimientos de carga de un dispositivo móvil.

---

<sup>2</sup> La investigación proyectiva son todas aquellas investigaciones que conducen a inventos, programas, diseño o a creaciones dirigidas a cubrir una determinada necesidad, y basada en conocimientos anteriores [57].

10. Desarrollo de un caso de estudio. Se realizó una experiencia educativa mediada por TIC en una escuela rural aislada. Durante el desarrollo de la experiencia se utilizaron:
- Los modelos de consumo y energía disponible (incisos 5 y 6).
  - El prototipo y la aplicación móvil (inciso 8) para facilitar la aplicación de los modelos.
  - Paneles fotovoltaicos optimizados (inciso 9) para suministrar energía a los dispositivos
- El uso de estos elementos, permitió a maestros y alumnos, el acceso a contenidos educativos digitales mediante el uso de dispositivos móviles abastecido con energía solar fotovoltaica.
11. Evaluación. Se evaluaron los resultados obtenidos para determinar las mejoras introducidas y verificar que las carencias detectadas al comenzar la investigación hayan sido subsanadas.

## Capítulo 4: Reducción del consumo de energía

### 4.1 Caracterización del consumo energético

El perfilador de consumo energético utilizado en esta tesis, Trepn Profiler (Apartado 2.4), estima la potencia utilizada por una aplicación móvil incluyendo la potencia que el dispositivo consume en modo *Standby* (Figura 4-1), denominada potencia base. Por esta razón, para caracterizar el consumo de una aplicación, se debe restar a este consumo la potencia base consumida por el dispositivo.

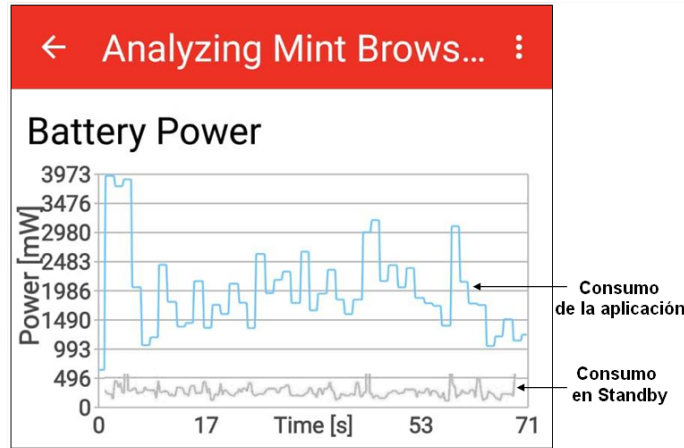


Figura 4-1: Caracterización del consumo en Trepn Profiler

A continuación se explica este aspecto mediante un ejemplo y utilizando gráficos para ilustrar el consumo en el dispositivo móvil.

En la Figura 4-2 se observa el consumo de una aplicación móvil ejecutada en un dispositivo: La energía utilizada ( $e_1$ ) en 5 segundos ( $t_1$ ) por una aplicación (App1) que consume en promedio 570mW ( $p_1$ ).

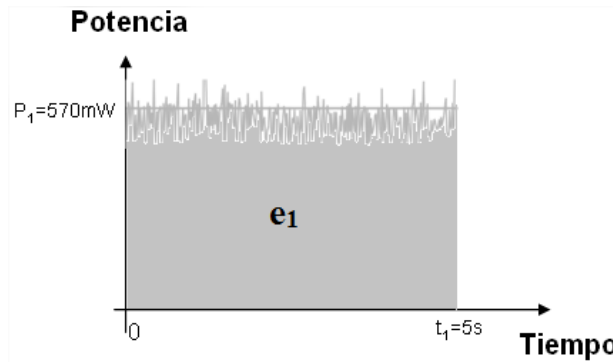


Figura 4-2: Consumo energético de una aplicación incluyendo la energía base

La energía consumida por el dispositivo será:

$$e_{tot} = e_1 = \int_0^{t_1} p(t)dt \cong p_1 \times t_1 = 0,570W \times 5s = 2,85Ws = 2,85J$$

Este valor incluye el consumo en modo *standby* (base) y el consumo de la aplicación.

Si se desea establecer el consumo de la aplicación, primero se debe determinar el consumo del dispositivo en modo *standby*, caracterizando el consumo del dispositivo sin ejecutar aplicaciones (Figura 4-3). Donde,  $e_0$  es la energía consumida por el dispositivo en modo *standby*, en 5 segundos, utilizando una potencia promedio de 230mW.

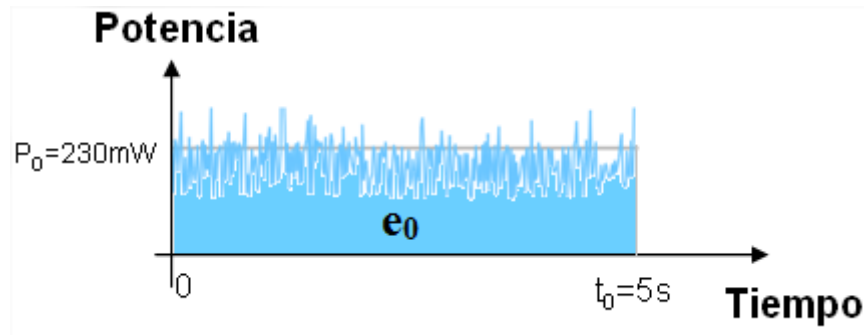


Figura 4-3: Consumo en modo standby

En la Figura 4-4 se observa la energía consumida por el dispositivo dividida en dos partes: energía base ( $e_0$ ) y energía consumida por la aplicación ( $e_1$ ).

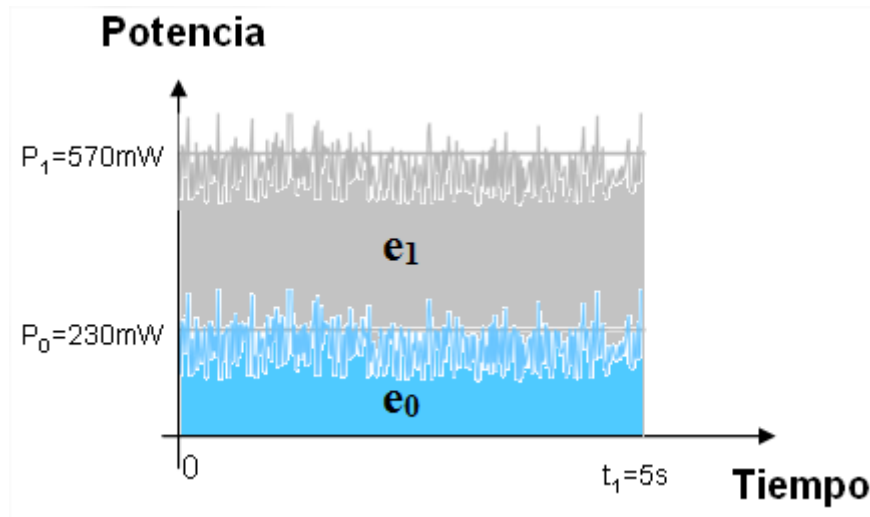


Figura 4-4: Consumo energético ejecutando una aplicación

La energía consumida, ahora se puede calcular por separado:

$$e_0 = \int_0^{t_0} p(t)dt \cong p_0 \times t_0 = 0,230W \times 5s = 1,15Ws = 1,15J$$

$$e_1 = \int_0^{t_0} p(t)dt \cong (p_1 - p_0) \times t_1 = (0,570W - 0,230W) \times 5s = 1,7Ws = 1,7J$$

$$e_{\text{tot}} = e_0 + e_1 = 1,15 + 1,7 = 2,85J$$

Es muy difícil predecir cuando el usuario va a ejecutar una aplicación y por cuánto tiempo, siempre existirán períodos en los cuales el usuario no se encuentre ejecutando la aplicación y mantenga el dispositivo en modo *standby*. Esto se ilustra en la Figura 4-5, en la cual se observa que el usuario comenzó a utilizar la aplicación en el instante  $t_{1\text{ini}} = 2s$  y finalizó en  $t_{1\text{fin}} = 4s$ .



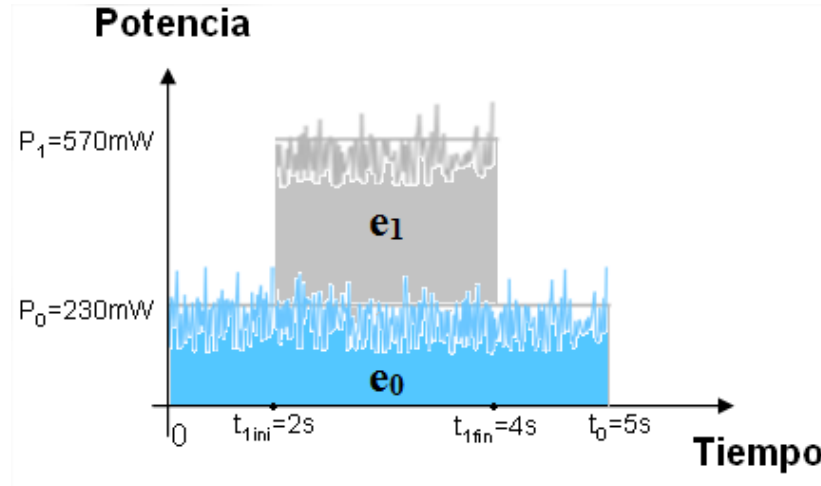


Figura 4-5: Consumo energético de una tarea, sin considerar la energía en Standby

En este caso, la energía se calcula de la siguiente manera:

$$e_0 = \int_0^{t_0} p(t)dt \cong p_0 \times t_0 = 0,230W \times 5s = 1,15Ws = 1,15J$$

$$e_1 = \int_0^{t_0} p(t)dt \cong (p_1 - p_0) \times (t_{1fin} - t_{1ini}) = (0,570W - 0,230W) \times (4s - 2s) = 0,68Ws = 0,68J$$

$$e_{tot} = e_0 + e_1 = 1,15 + 0,68 = 1,83J$$

## 4.2 Reducción del consumo de energía en el dispositivo móvil

Se desarrolló un procedimiento para reducir el consumo de energía en aplicaciones móviles de uso frecuente en zonas rurales aisladas. A continuación, se explica paso a paso, el procedimiento:

1. Seleccionar tareas de uso frecuente en la zona rural de estudio, entre otras se pueden mencionar: Navegación Web, acceso a correo electrónico, Geo-Posicionamiento, Reproducción de audio y video. En la selección de tareas se deben considerar las limitaciones tecnológicas de la zona (Ej.: Cobertura de red celular limitada, 2G en lugar de 3G).
2. Asignar aplicaciones móviles para ejecutar las tareas, en función de los requerimientos informáticos de los pobladores y/o visitantes de la zona. En la Tabla 4-1 se mencionan ejemplos de tareas y aplicaciones.

| TAREA                         | APLICACIONES  |
|-------------------------------|---|
| Navegación Web                | Google Chrome, Mozilla firefox, Opera Mini, Mint        |
| Envío de SMS                  | Google Hangout, Handcent SMS                            |
| Acceso a correo electrónico   | Google mail, Microsoft Outlook                          |
| Mensajería instantánea        | Whatsapp, Facebook Messenger, Google Hangout            |
| Geo-Posicionamiento           | GPS status, GPS Essentials, GPS test                    |
| GPS Tracking                  | Geo tracker, GPS hiking, My track                       |
| Navegación GPS                | Google maps, GPS navigation & Maps                      |
| Captura de fotos              | Google camera, Retrica, Wondershare Powercam, Instagram |
| Filmación de videos           | Cinema FV-5, Wondershare Powercam, Instagram            |
| Reproducción de audio y video | MX player, VLC player, KMPlayer                         |

Tabla 4-1: Tareas de uso frecuente en zona rural y aplicaciones para ejecutarlas.

3. Determinar el consumo energético de las aplicaciones para realizar la tarea asignada dentro de ciertos parámetros de rendimiento (Ej.: Latencia y *Throughput*). Se utiliza la técnica de medición presentada en el apartado 3.1.2.
4. Seleccionar la aplicación que consuma menos energía para ejecutar la tarea (eficiencia energética).

En la Tabla 4-2 se resumen los pasos del procedimiento:

|  |  |
|--|--|
| Seleccionar tarea                                    | $T_1$  |
| Asignar aplicaciones para ejecutar las tareas.       | $T_1 - \text{App}_1, \text{App}_2, \text{App}_3, \text{App}_4$                       |
| Determinar el consumo energético de las aplicaciones | $c_1=c(\text{App}_1), c_2=c(\text{App}_2), c_3=c(\text{App}_3), c_4=c(\text{App}_4)$ |
| Establecer el consumo energético de las tareas       | $c(T_1) = \min(c_1, c_2, c_3, c_4)$  |

Tabla 4-2: Eficiencia energética para realizar una tarea

En la Figura 4-6 se ilustra un ejemplo de uso del procedimiento. Se eligieron 4 aplicaciones para realizar la tarea “Descarga de contenidos WEB”. Se observa que la aplicación Focus consume 1632mW, Chrome 1549mW, Opera 1720mW y Mint 1470mW. Se selecciona la aplicación de menor consumo para realizar la tarea: Mint 1470mW.

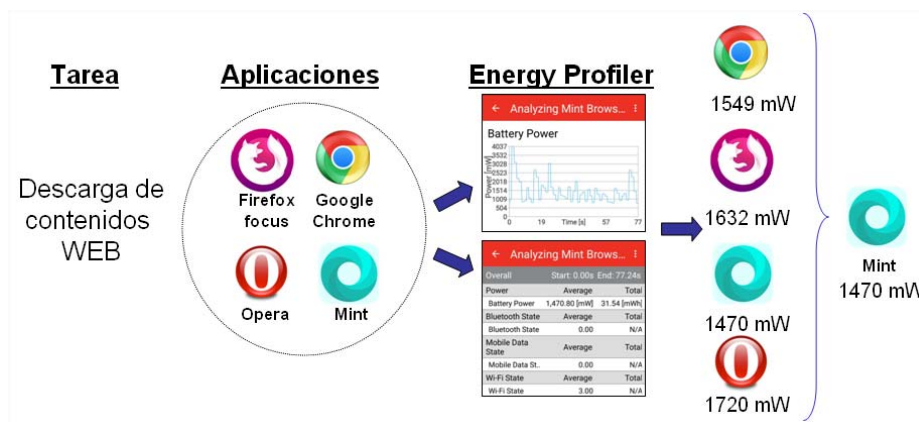


Figura 4-6: Eficiencia energética para realizar una tarea en un dispositivo móvil

El procedimiento fue utilizado en las siguientes publicaciones:

- Cargadores solares portátiles para el uso de dispositivos móviles en zonas rurales aisladas del NOA [5].
- Mini sistemas fotovoltaicos para el uso de dispositivos móviles en zonas rurales: Optimización de la potencia entregada y consumida [4].

### 4.3 Reducción del consumo de energía en las comunicaciones

Los usuarios de celulares zonas aisladas disponen de servicios de datos con tasas de transmisión bajas que se reducen aún más cuando se conectan varios dispositivos simultáneamente. En estas condiciones, las aplicaciones móviles se vuelven inestables,

generando un gran número de retransmisiones que degradan el rendimiento e incrementan el consumo de energía en los dispositivos móviles, generando un inconveniente adicional para los usuarios, ya que en este tipo de zonas la energía es limitada y existen pocas posibilidades de recarga.

En este apartado se realiza un estudio comparativo de rendimiento y consumo de energía en 3 escenarios, que utilizan los servicios de la red celular para comunicar celulares de zonas aisladas a servidores de Internet. En cada escenario, se implementó un canal de comunicación extremo a extremo entre un dispositivo móvil y un servidor de Internet y se inyectó tráfico para medir el rendimiento y consumo energético.

Los resultados obtenidos en cada escenario fueron comparados para determinar las diferencias en el rendimiento y consumo de energía. Las desviaciones que surgieron de estas comparaciones permitieron establecer cuál es el escenario que mejor se adapta a las zonas aisladas.

#### **4.3.1 Tecnologías de telefonía celular disponibles en zonas aisladas**

Existen diferentes tecnologías de telefonía celular que brindan soporte para la conexión de dispositivos móviles, desplegados en zonas remotas, a Internet. Estas tecnologías fueron evolucionando en el tiempo y esas evoluciones son las denominadas generaciones: Segunda generación o 2G (GSM, GPRS, y EDGE), Tercera generación o 3G (UMTS, HSDPA, HSUPA y HSPA+) y Cuarta generación o 4G (LTE y LTE Advanced).

Para el despliegue de los escenarios, se eligió la tecnología GPRS por sobre tecnologías como 3G o 4G, fundamentando esta elección en las siguientes razones:

- Cobertura en la zona de despliegue.  
En zonas remotas, por lo general, sólo se dispone de tecnología 2G (GSM/GPRS). Las tecnologías 3G (UMTS, HSPA) y 4G (LTE) se encuentran en zonas con gran concentración de usuarios y su implementación en zonas alejadas implica un importante recambio tecnológico por parte de las compañías de celulares.
- El consumo de energía es menor en los dispositivos móviles que utilizan GPRS, en comparación con los que utilizan UMTS o HSPA. En [58] y [59] se presentan estudios relacionados con el consumo de energía en diferentes tecnologías celulares, los resultados muestran que GPRS consume entre un 40% y 70% menos energía comparado con UMTS. Esta diferencia de consumo se debe a dos razones:
  1. El número de estaciones base compatibles con los estándares UMTS/HSDPA es limitado en zonas alejadas, por este motivo los dispositivos móviles 3G deben conectarse a antenas situadas a grandes distancias, lo que implica utilizar mayor potencia para transmitir los datos.
  2. Las velocidades de transferencia alcanzables por los estándares 3G y 4G requieren de modulaciones más complejas, las cuales necesitan de muchos cálculos adicionales y obligan a un mayor uso de CPU a los dispositivos y, por lo tanto, a un mayor consumo de energía.
- Velocidad de transferencia.

En la Tabla 4-3 se muestran las velocidades de transferencia de las diferentes tecnologías, desde GPRS hasta LTE-Advanced. Debe notarse que a partir de la tecnología WCDMA se utilizan diferentes velocidades para el enlace descendente (DL - DownLink) y para el ascendente (UL – UpLink). Si bien la velocidad máxima de transferencia que soporta la red EDGE (473,6 Kbit/s) es pequeña en comparación a UMTS, alcanza para establecer una conexión con un servidor de Internet.

| Generación      | 2G         |            | 3G           |          |           |               | 4G       |              |
|-----------------|------------|------------|--------------|----------|-----------|---------------|----------|--------------|
| Tecnología      | GPRS       | EDGE       | WCDMA (UMTS) | HSDPA    | HSUPA     | HSPA+         | LTE      | LTE Advanced |
| (DL - Downlink) | 171,2 Kbps | 473,6 Kbps | 2,0 Mbps     | 7,2 Mbps | 14,4 Mbps | 21/42 Mbps    | 100 Mbps | 1,0 Gbps     |
| (UL - Uplink)   | 171,2 Kbps | 473,6 Kbps | 474 Kbps     | 384 Kbps | 5,76 Mbps | 7,2/11,5 Mbps | 50 Mbps  | 0,5 Gbps     |

Tabla 4-3: Tasa de datos máxima teórica para las tecnologías de celular.

- Proporciona transporte de datagramas IPv4.

## 4.3.2 Equipamiento utilizado

### 4.3.2.1 Servidor

El servidor de pruebas (“Testing”) se instaló en la DMZ del campus de la Universidad Nacional de Salta (UNSa) y se le asignó un IP público (190.221.183.199). La DMZ de la UNSa se encuentra conectada a Internet a través de un enlace sincrónico de 20Mbps.

La configuración del servidor de infraestructura utilizado en el escenario de pruebas, es la siguiente:

| Servidor Testing      |                                 |
|-----------------------|---------------------------------|
| Equipo                | Lenovo TS150                    |
| CPU                   | Xeon E3-1245 V6                 |
| Chipset               | Intel H57                       |
| RAM                   | 8 Gbytes DDR4-SDRAM             |
| Disco rígido          | 2 Tbytes, Serial ATA, 10000 RPM |
| LAN                   | Gigabit Ethernet                |
| WAN                   | Enlace sincrónico de 20Mbps     |
| IP público            | 190.221.183.220                 |
| DNS Name              | di.unsa.edu.ar                  |
| SO                    | Debian 9 Stretch                |
| Servicios Habilitados | - Stack TCP/IP<br>- SSH Server  |
| Software Instalado    | - Iperf 3.0 [60]                |

Tabla 4-4: Configuración del Servidor

#### 4.3.2.2 Dispositivos Móviles

La configuración de los dispositivos móviles utilizados en los distintos escenarios de pruebas, es la siguiente:

| Dispositivos móviles    |   |
|-------------------------|---|
| Equipo                  | Xiaomi Redmi 7A   |
| CPU                     | Octa-core (2x2.0 GHz Cortex-A53 & 6x1.45 GHz Cortex A53)                          |
| Chipset                 | Qualcomm SDM439 Snapdragon 439 (12 nm)  |
| RAM                     | 2Gbytes RAM   |
| SO                      | Android 8.0 (Oreo)  |
| Root                    | SI  |
| 2G                      | GSM 850 / 900 / 1800 / 1900 MHz<br>GPRS Up to 114 kbps; EDGE Up to 560 kbps       |
| 3G                      | HSDPA 850 / 900 / 1900 / 2100 MHz<br>HSDPA, up to 21 Mbps; HSUPA, up to 5.76 Mbps |
| Bluetooth               | 4.2, A2DP, LE   |
| WLAN                    | Wi-Fi 802.11 b/g/n, Wi-Fi Direct, hotspot   |
| Batería                 | Li-Po 4000 mAh, 3.7 v.  |
| Aplicaciones Instaladas | - Jackpal Android terminal emulator [39]<br>- Iperf [38]<br>- Trepn profiler      |

Tabla 4-5: Configuración de los dispositivos móviles Cliente

Los equipos fueron especialmente preparados para las pruebas, se procedió entonces a:

- Desinstalar las aplicaciones no indispensables para su funcionamiento.
- Detener procesos en segundo plano.
- Deshabilitar dispositivos de hardware no utilizados.
- Deshabilitar actualizaciones
- Cargar la batería al 80%.

#### 4.3.3 Escenarios de comunicación

Se implementaron los siguientes escenarios de comunicación:

- Conexión directa a la red celular
- Piconet Bluetooth
- Wifi Mobile Hotspot.

Los tres escenarios fueron desplegados en el centro de estimulación y desarrollo escolar de la localidad de Yacones, perteneciente al municipio de Vaqueros de la Provincia de Salta. Esta localidad dispone de cobertura de red celular 2G (GSM/GPRS/EDGE) muy limitada, similar a la existente en zonas aisladas.

En la Figura 4-7 se muestran la información de red generada por la aplicación Network Signal Info [61], ejecutada en uno de los nodos. Además de la ubicación geográfica, se observa que la estación base GSM se encuentra a 6Km de distancia y la fuerza de la señal es de -81 dBm. El indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI por las siglas del inglés

Received Signal Strength Indicator), es una escala de referencia para medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo móvil. La escala tiene al valor 0 (cero) como centro; representa 0 RSSI, o 0 dBm, generalmente la escala se expresa dentro de valores negativos; cuanto más negativo, mayor pérdida de señal. Se considera Excelente (Más de -71 dBm), Muy buena (entre -87 y -71), Buena (entre -97 y -87) y Baja (entre -120 y -97).



Figura 4-7: Gráficos generados por la aplicación Network Signal Info

#### 4.3.3.1 Conexión directa

En este escenario los dispositivos móviles (nodos) se conectan en forma directa al servidor utilizando los servicios de la red celular (Figura 4-8). Cada dispositivo se conecta al servidor utilizando un canal de comunicación TCP/IP extremo a extremo (*end to end*). El tráfico entre los nodos y el servidor se gestiona a través de los enrutadores de la red celular; desde donde y a través de Internet son encaminados para ser entregados al servidor.

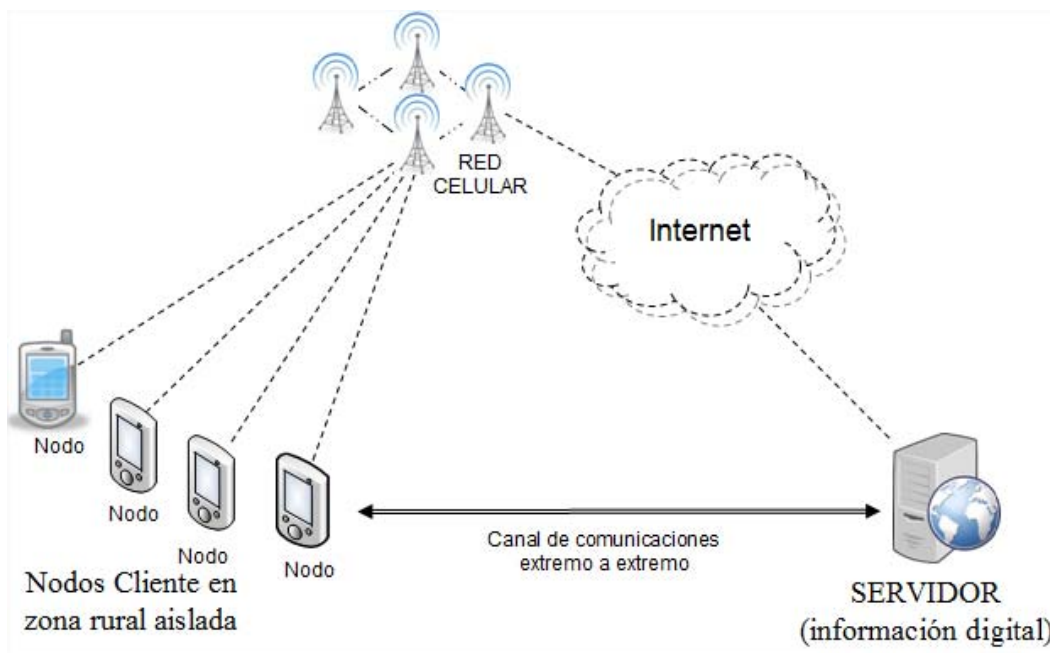


Figura 4-8: Conexión directa

En la Tabla 4-6 se resumen las características más importantes de este escenario:

|  |           |
|--|-----------|
| Tecnología celular                                 | GPRS/EDGE |
| Distancia entre el Gateway y la estación base GSM. | 6 km      |
| Potencia de señal                                  | -81 dBm   |

Tabla 4-6: Características del escenario comunicación directa

## Configuración

### Gateway

Este escenario no requiere de un Gateway, todos los dispositivos actúan como nodos Cliente.

### Nodos

Se establece un canal de comunicación (TCP/IP) entre los nodos cliente y el servidor habilitando los datos móviles en cada dispositivo cliente:

- Settings – More settings – Mobile networks – Network Mode -> GSM only
- Settings – More settings – Mobile networks – Mobile data -> ON

#### 4.3.3.2 Piconet Bluetooth

En la Figura 4-9 se observa la representación gráfica de este escenario. En el mismo se conecta una Piconet Bluetooth, desplegada en zona remota, a un servidor de Internet, utilizando los servicios de transporte de la red celular (GPRS/EDGE) [62]. Los celulares de la Piconet se conectan al servidor utilizando un canal de comunicación TCP/IP extremo a extremo (*end to end*). El tráfico entre los nodos móviles y el servidor se gestiona a través de uno de los nodos que actúa como Gateway entre la Piconet y la red celular. Este nodo es el



encargado de enviar los paquetes de datos hacia los enrutadores de la red celular; desde donde y a través de Internet son encaminados para ser entregados al servidor.

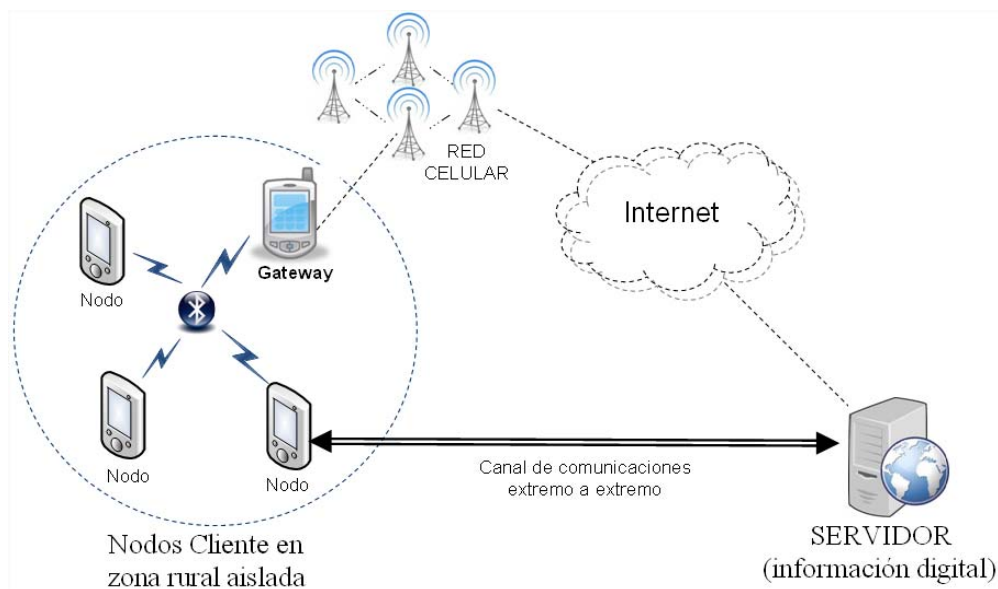


Figura 4-9: Piconet bluetooth

A continuación se resumen las características más importantes de este escenario:

|  |  |
|--|--|
| Tecnología elegida para el despliegue              | Bluetooth 4.0 LE   |
| Interfaces Bluetooth utilizadas                    | Clase 1 (alcance teórico de hasta 100 metros y potencia máxima de 100mW) |
| Distancia entre el nodo Cliente y el Gateway       | 10   |
| Configuración de la piconet Bluetooth              | Perfil PAN y protocolo BNEP [63]   |
| Frecuencia   | 2,4GHZ   |
| Número máximo de nodos                             | 7  |
| Tecnología celular                                 | EDGE/GPRS  |
| Distancia entre el Gateway y la estación base GSM. | 6 km   |
| Potencia de señal                                  | -81 dBm  |

Tabla 4-7: Características del escenario Piconet Bluetooth

## Configuración

### Gateway

- Habilitar los datos móviles:  
Settings – More settings – Mobile networks – Mobile data -> ON
- Habilitar Bluetooth:  
Settings – More settings – Bluetooth -> ON
- Habilitar el acceso compartido a Internet por Bluetooth  
Settings – Connections – Mobile hotspot and tethering > Bluetooth tethering -> ON

### Nodos

Para establecer un canal de comunicación entre los nodos cliente y el servidor se debe brindar transporte IP entre el nodo cliente y el servidor a través del Gateway Bluetooth:



- Deshabilitar los datos móviles:  
Settings – More settings – Mobile networks – Mobile data -> OFF
- Habilitar Bluetooth:  
Settings – More settings – Bluetooth -> ON
- Conectar dispositivo Cliente con el Gateway.  
Buscar el dispositivo Gateway y Emparejar (*Pair*), se mostrará un código de confirmación en ambos dispositivos (Figura 4-10)
- Habilitar el acceso a Internet en el cliente a través del Gateway (Figura 4-11).  
Settings – More settings – Bluetooth -> Internet access -> ON

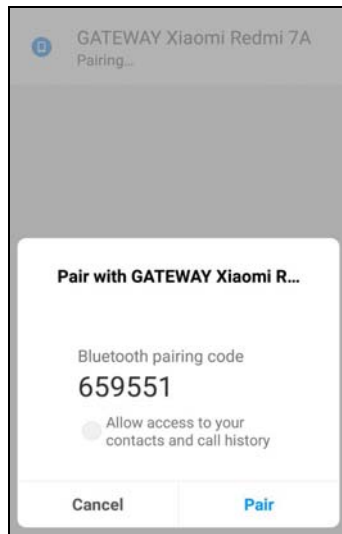


Figura 4-10: Pairing Bluetooth

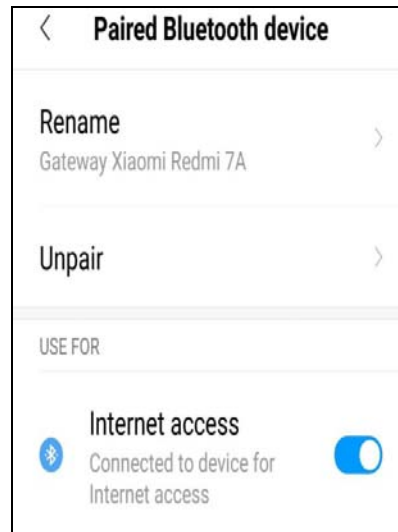


Figura 4-11: Acceso a Internet por Bluetooth

#### 4.3.3.3 Mobile Hotspot

En el contexto de las comunicaciones inalámbricas, un Hotspot es un lugar (o punto) que ofrece acceso a Internet a través de una red inalámbrica y un enrutador conectado a Internet.

En la Figura 4-12 se observa la representación gráfica de este escenario. En el mismo se conecta una red Wifi, desplegada en zona remota, a un servidor a través de la red celular (GSM/EDGE). Uno de los celulares se conecta al servidor utilizando un canal de comunicación TCP/IP extremo a extremo (*end to end*). El tráfico entre el nodo móvil y el servidor se gestiona a través de uno de los nodos que actúa como un punto de acceso Wifi (Mobile Hotspot). Este nodo es el encargado de enviar los paquetes de datos hacia los enrutadores de la red celular; desde donde y a través de Internet son encaminados para ser entregados al servidor.

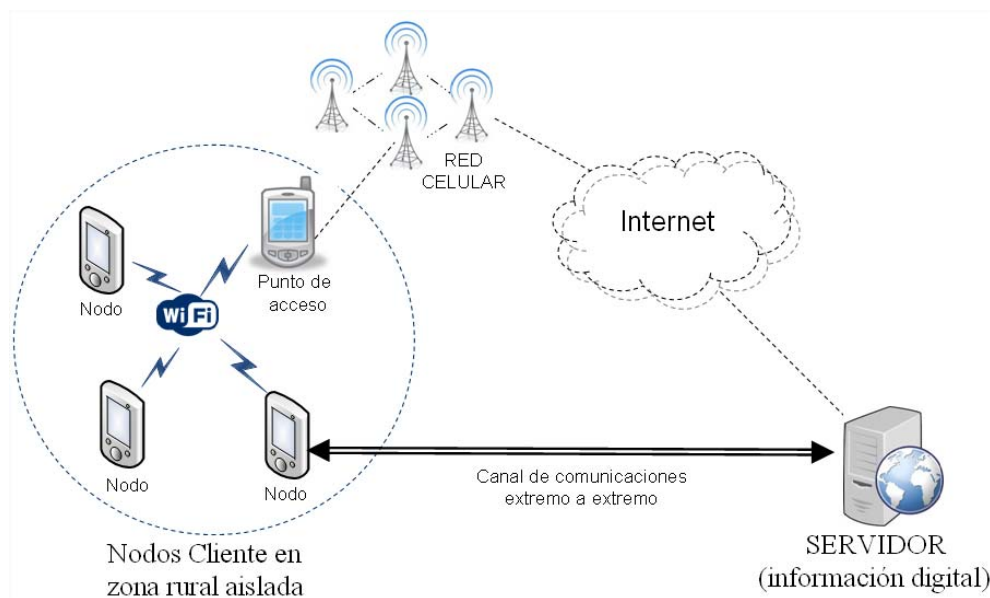


Figura 4-12: Mobile hotspot

En la Tabla 4-8 se resumen las características más importantes de este escenario.

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Tecnología elegida para el despliegue              | Wifi                  |
| Alcance máximo                                     | 100 metros            |
| Distancia entre el nodo Cliente y el Gateway       | 10 metros             |
| Configuración de la red Wifi                       | IEEE 802.11g - 2,4GHZ |
| Número máximo de nodos                             | 30                    |
| Tecnología celular                                 | GPRS/EDGE             |
| Distancia entre el Gateway y la estación base GSM. | 6 km                  |
| Potencia de señal                                  | -81 dBm               |

Tabla 4-8: Características del escenario Mobile Hotspot

## Configuración

Para establecer un canal de comunicación entre el nodo cliente y el servidor se debe brindar transporte IP entre el nodo cliente y el servidor a través del nodo que actúa como punto de acceso.

## Gateway

- Habilitar los datos móviles:  
Settings – More settings – Mobile networks – Mobile data -> ON
- Compartir los datos móviles por Wifi (Figura 4-13):  
Settings – Connections – mobile hotspot ->ON  
Settings – Connections – mobile hotspot ->Wi-Fi sharing ->ON  
Settings – Connections – mobile hotspot -> Network Name -> “Gateway Wifi”  
Settings – Connections – mobile hotspot -> Password -> Dejar en blanco

Si bien es posible definir una contraseña para la red Wifi, esto no se recomienda ya que se activa el acceso protegido a la red, WPA2/PSK [64] con encriptación AES, que introduce un considerable consumo adicional de energía en los dispositivos [65].

## Nodos

- Deshabilitar los datos móviles en el dispositivo cliente:  
Settings – More settings – Mobile networks – Mobile data -> OFF
- Habilitar Wifi  
Settings – Connections – Wi-Fi -> ON
- Conectar el celular cliente al Wifi.  
Buscar el SSID “Gateway WiFi”

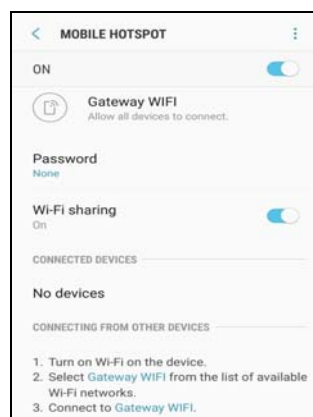


Figura 4-13: Configuración del Hotspot

### 4.3.4 Métricas utilizadas

Para determinar el rendimiento del canal de comunicaciones extremo a extremo, entre el nodo cliente y el servidor, se utilizaron las siguientes métricas: Latencia, *Throughput* y Consumo de energía (en el cliente).

En la Tabla 4-9 se mencionan las aplicaciones, del lado del cliente y del lado del servidor, y los tests utilizados para generar tráfico entre el cliente y el servidor.

| Métrica        | Aplicación Cliente | Aplicación Servidor | Prueba   |
|----------------|--------------------|---------------------|--|
| Latencia ICMP  | Busybox Ping       | Debian Stack TCP/IP | Echo Request/Reply (32 bytes)                    |
| Throughput TCP | Iperf              | Iperf Server        | Inyección de tráfico TCP aleatorio (1024 Kbytes) |

Tabla 4-9: Aplicaciones utilizadas para los tests

A modo de ejemplo, en la Tabla 4-10 se muestra como son utilizadas las aplicaciones (en el Servidor y en el Cliente) para inyectar tráfico en un escenario de 5 nodos (N1 a N5).

| Métrica        | Aplicación   | Server  | Clientes  |
|----------------|--------------|---|---|
| Latencia ICMP  | Busybox ping | ICMP habilitado   | N1: Ping -t di.unsa.edu.ar > n1.log<br>N2: Ping -t di.unsa.edu.ar > n1.log<br>N3: Ping -t di.unsa.edu.ar > n1.log<br>N4: Ping -t di.unsa.edu.ar > n1.log<br>N5: Ping -t di.unsa.edu.ar > n1.log   |
| Throughput TCP | Iperf3       | Terminal 1: iperf3 -s -p 5201 >n1.log<br>Terminal 2: iperf3 -s -p 5202 >n2.log<br>Terminal 3: iperf3 -s -p 5203 >n3.log<br>Terminal 4: iperf3 -s -p 5204 >n4.log<br>Terminal 5: iperf3 -s -p 5205 >n5.log | N1: iperf3 -c di.unsa.edu.ar -p 5201 -t 60 -n 1024k<br>N2: iperf3 -c di.unsa.edu.ar -p 5202 -t 60 -n 1024k<br>N3: iperf3 -c di.unsa.edu.ar -p 5203 -t 60 -n 1024k<br>N4: iperf3 -c di.unsa.edu.ar -p 5204 -t 60 -n 1024k<br>N5: iperf3 -c di.unsa.edu.ar -p 5205 -t 60 -n 1024k |

Tabla 4-10: Tests realizados para 5 nodos

Los archivos “log” generados por “Busybox ping” fueron almacenados en la memoria SD interna de cada dispositivo Cliente, mientras que los de “Iperf3” se almacenaron en el disco del servidor.

#### 4.3.5 Mediciones realizadas

Se desplegaron los tres escenarios propuestos utilizando uno, dos, tres, cuatro y cinco nodos. Las mediciones se realizaron de manera automática, utilizando scripts y aplicaciones que corrieron de forma continua durante 7 días en la franja horaria 7:00 am a 7:00 pm, de esta manera se contemplaron diferentes niveles de carga de la red celular. Los resultados obtenidos se promediaron para determinar el valor final de cada medición.

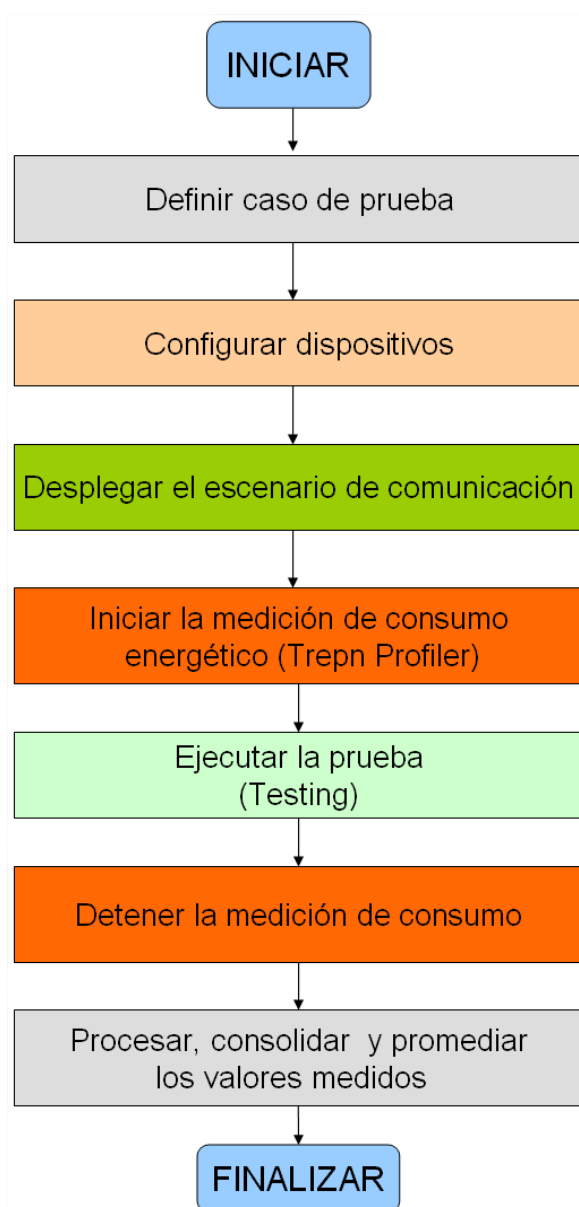


Figura 4-14: Procedimiento para medir el rendimiento y el consumo energético en los escenarios de comunicación

A continuación se resumen las actividades realizadas (Figura 4-14) para determinar las métricas de consumo y rendimiento en los escenarios propuestos:

- Definición de caso de prueba. Se selecciona escenario (conexión directa, piconet o hotspot), cantidad de nodos (1 a 5), métrica de rendimiento y prueba a realizar (Tabla 4-9)
- Configuración de los dispositivos móviles. Se desinstalan las aplicaciones no utilizadas, se detienen los procesos en segundo plano, se deshabilitan los dispositivos de hardware y radios de comunicación no utilizados, se desactivan las actualizaciones automáticas del Sistema y de Google Play.
- Despliegue del escenario. Se configura un canal de comunicación extremo a extremo entre cada Cliente y el Servidor.
- Inicialización del registro de consumo energético. En cada dispositivo, se ejecuta la aplicación Trepn Profiler y se inicia el monitoreo de consumo de energía para la aplicación seleccionada.
- Ejecución del caso de prueba. En cada dispositivo, se ejecuta la prueba con la aplicación seleccionada y utilizando el escenario desplegado. La aplicación inyecta tráfico entre el Cliente y el Servidor y almacena la salida en un archivo “log” en la memoria SD del dispositivo. Se genera un “log” por dispositivo.
- Finalización del registro de consumo energético. En cada dispositivo, se detiene Trepn Profiler y se guardan las trazas de ejecución generada.
- Análisis de resultados. En cada dispositivo, se procesan las trazas de ejecución generadas por el profiler y los archivos “log” generados por la aplicación utilizada para la prueba. Luego, los datos se consolidan y promedian para obtener las métricas de Consumo y Rendimiento.

Una vez obtenidos los valores promedio de todas las pruebas, se procedió a generar los gráficos comparativos que se presentan en el siguiente apartado.

### **4.3.6 Resultados**

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en las mediciones, utilizando gráficos comparativos que resumen los aspectos estudiados.

#### **4.3.6.1 Latencia ICMP**

En la Figura 4-15 se evidencia que el uso de un Gateway de comunicaciones introduce un incremento aceptable en la latencia: 12% para Bluetooth y 16% para Wifi. A modo de referencia y para ilustrar el bajo rendimiento de las redes celulares disponibles en zonas rurales en comparación con las redes de zonas urbanas, se incluye en el gráfico la latencia para una red 4G en zona urbana. Se observa una diferencia de latencia de más de un 300%.

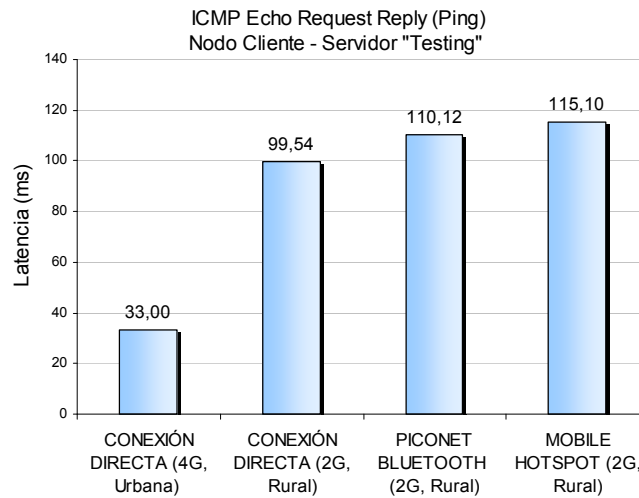


Figura 4-15: Latencia promedio para diferentes escenarios de 5 nodos.

#### 4.3.6.2 Throughput TCP

La comparación de los valores de *throughput*, obtenidos en los escenarios implementados con diferentes cantidades de nodos, se muestra en el gráfico de la Figura 4-16. Del mismo se desprende que el *throughput* disminuye a medida que se agregan nodos y que las diferencias de rendimiento entre los tres escenarios no son significativas. Además, se observa que con 3 nodos o más el escenario Wifi Mobile Hotspot entrega mejor rendimiento que el escenario de conexión directa, mientras que el escenario Piconet Bluetooth entrega un mejor rendimiento a partir de los 4 nodos.

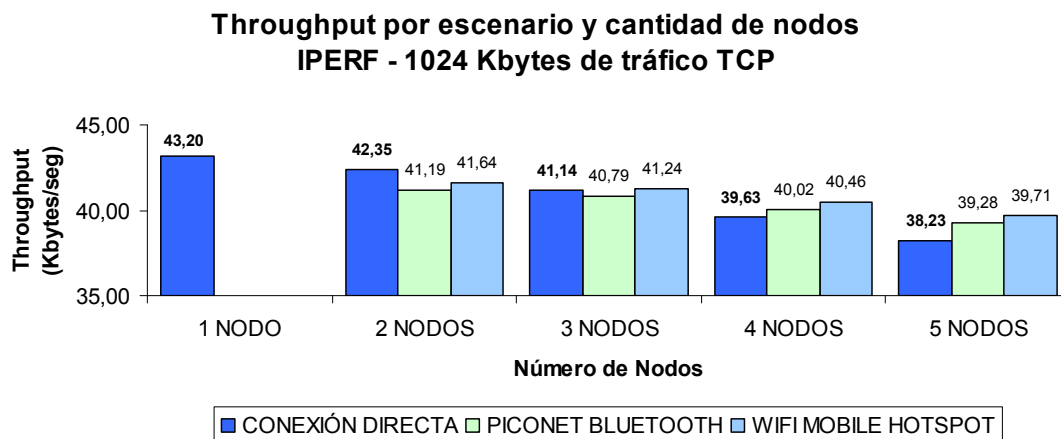


Figura 4-16: Throughput para tráfico TCP generado por IPerf

#### 4.3.6.3 Consumo de energía

En el gráfico de la Figura 4-17 se observa el consumo promedio de energía para los tres escenarios. Para “n” nodos:

Conexión Directa: Promedio de “n” nodos cliente (el escenario no requiere Gateway)

Piconet Bluetooth: Promedio de “n” nodos cliente, incluyendo al Gateway.

WiFi Mobile Hotspot: Promedio de “n” nodos cliente, incluyendo al Gateway.

Si  $n=1$  sólo se considera conexión directa.

Si tomamos como valor de referencia el consumo de los nodos en una conexión directa, se evidencia que en el caso de Bluetooth se obtiene una reducción de energía cuando la Piconet tiene 3 o más nodos (incluyendo al Gateway), mientras que en el caso de Wifi Mobile Hotspot esto ocurre cuando la red tiene 5 o más nodos (incluyendo al Hotspot).

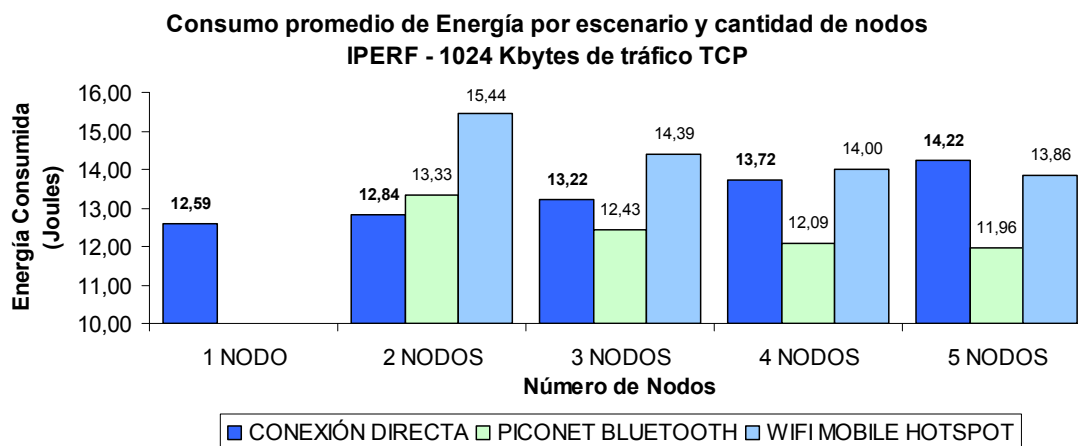


Figura 4-17: Consumo de energía para tráfico TCP generado por IPerf

Para ilustrar el impacto del uso de un Gateway en una Piconet Bluetooth, en la Figura 4-18 se presenta el consumo por nodo en una Piconet de 5 dispositivos: 4 nodos y 1 Gateway. Se observa que el consumo de energía se duplica en el Gateway, esto se debe a que el dispositivo que actúa como Gateway tiene activada la funcionalidad de ruteo y encendidos dos radios de comunicación: Bluetooth y Celular.

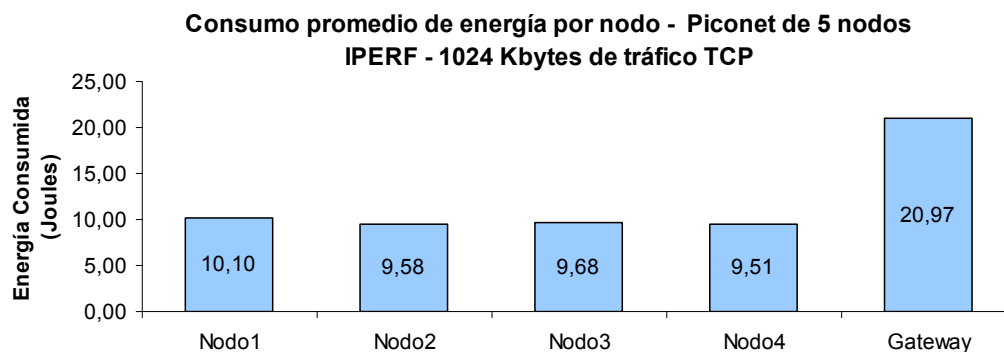


Figura 4-18: Consumo de energía para una piconet de 5 nodos

Lo mismo ocurre si se utiliza un Mobile Hotspot en una red Wifi (Figura 4-19), aunque en este caso el consumo en los nodos cliente y Gateway será superior, ya que el consumo del radio Wifi es superior al consumo del radio Bluetooth.

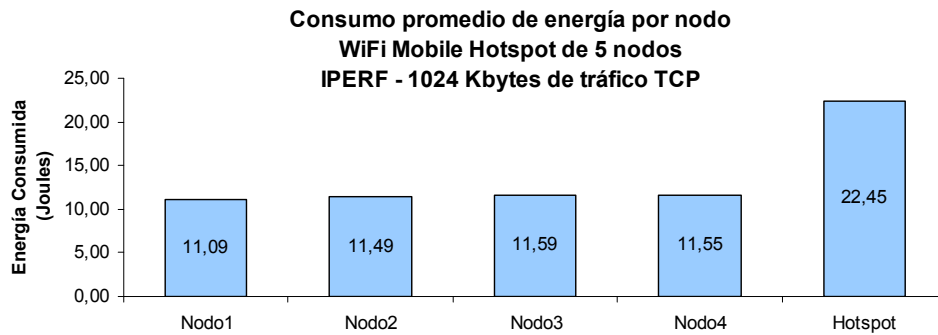


Figura 4-19: consumo de energía para una red Wifi Mobile Hotspot de 5 nodos

El consumo adicional de energía que introduce el Gateway o el Hotspot, dependiendo del escenario, se puede distribuir entre los nodos conectados promediando los valores. Por lo tanto, mientras más nodos se conecten a la red, menor será el impacto sobre cada nodo. Ejemplo para 5 nodos:

Piconet:

$$\text{Energía acumulada} = (10,10 + 9,58 + 9,68 + 9,51 + 20,97) = 59,83$$

$$\text{Energía promedio} = 59,83 / 5 = 11,96 \text{ Joules}$$

Wifi Mobile Hotspot:

$$\text{Energía acumulada} = (11,09 + 11,49 + 11,59 + 11,55 + 22,45) = 68,17$$

$$\text{Energía promedio} = 68,17 / 5 = 13,63 \text{ Joules}$$

El valor promedio es de utilidad si se utiliza una fuente de energía única para todos los nodos (Ej. Grupo electrógeno). Si se dispone de una fuente de alimentación independiente por dispositivo (Ej. panel solar portátil), se debe considerar la reducción de consumo “por nodo”. Para analizar este aspecto en la Figura 4-20 se presenta un gráfico de consumo promedio por nodo, sin considerar el consumo del Gateway. Entonces, para “n” nodos:

Conexión Directa: Consumo promedio de “n” nodos cliente.

Piconet Bluetooth: Consumo promedio de “n-1” nodos cliente, no se incluye el Gateway.

Wifi Mobile Hotspot: consumo promedio de “n-1” nodos cliente, no se incluye el Gateway.

Si n=1 solo se considera conexión directa.

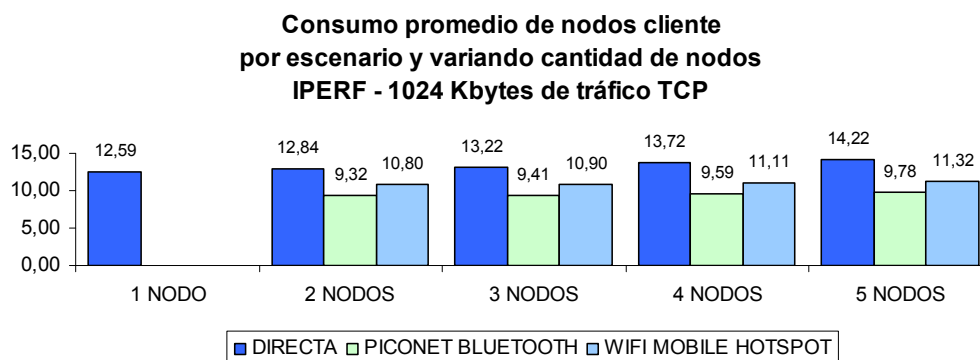


Figura 4-20: Consumo promedio de los nodos cliente para cada escenario



Se evidencia que la reducción del consumo de energía se consigue a partir de los 2 nodos y que el ahorro de energía es mayor a medida que se agregan nodos.

Si bien la reducción en el consumo no parece significativa para la prueba realizada, el impacto será importante cuando el dispositivo se utilice para realizar varias tareas simultáneas por periodos de tiempo largos.

#### 4.3.6.4 Ventajas y desventajas de cada escenario

A continuación se presentan las ventajas y desventajas de cada uno de los escenarios estudiados.

| Escenario                  | Ventajas   | Desventajas   |
|----------------------------|--|---|
| <b>Conexión Directa</b>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- No requiere configuración.</li> <li>- No requiere Gateway.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Todos los nodos utilizan la red celular, introduce congestión.</li> <li>- Los nodos se comunican con una estación base ubicada a gran distancia, lo que demanda un elevado consumo de potencia.</li> </ul> |
| <b>Piconet Bluetooth</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo un nodo se conecta a la red (Gateway), se reduce la congestión.</li> <li>- Los nodos no usan la red celular, se comunicación con el Gateway utilizando menor potencia, se reduce el consumo.</li> <li>- El nodo Gateway se puede ubicar en una ubicación estratégica para mejorar la ganancia de señal celular,</li> <li>- Introduce una reducción en el consumo de energía a partir de 3 nodos. Útil para fuente única de energía (Ej. Grupo electrógeno)</li> <li>- Al no utilizar los radios de comunicación celular, se reduce el consumo de energía en los nodos cliente. Útil para fuentes independientes de energía (Ej.: panel solar portátil)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La cantidad de nodos que se pueden conectar es limitada (7).</li> <li>- Requiere configuración adicional.</li> </ul>   |
| <b>Wifi Mobile Hotspot</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Solo un nodo se conecta a la red, se reduce la congestión.</li> <li>- Los nodos no usan la red celular, se comunicación con el Hotspot utilizando menor potencia, se reduce el consumo.</li> <li>- El nodo hotspot se puede ubicar en una ubicación estratégica para mejorar la ganancia de señal celular.</li> <li>- Introduce una reducción en el consumo de energía a partir de 4 nodos. De utilidad si se dispone de una fuente única de energía (Ej. Grupo electrógeno)</li> <li>- Al no utilizar los radios de comunicación celular, se reduce el consumo de energía en los nodos cliente. De utilidad si se dispone de de fuentes independientes de energía (Ej.: paneles solares portátiles)</li> <li>- No tiene limitaciones para el número de nodos.</li> <li>- Configuración simple</li> </ul> |   |

Tabla 4-11: Ventajas y desventajas de los escenarios de comunicación

#### **4.3.7 Conclusiones del capítulo**

El uso de un Gateway (o Hotspot) reduce el consumo en los nodos cliente, posibilitando que trabajen con fuentes de energía de capacidad reducida. No obstante, se debe prever una fuente de alimentación de mayor capacidad para el dispositivo que actúa como Gateway.

Los 3 escenarios estudiados funcionan de manera aceptable en zonas aisladas, la decisión de cuál utilizar dependerá de limitaciones y restricciones de la zona de despliegue.

En función de la cantidad de dispositivos a utilizar, se recomienda:

- Conexión directa - 1 a 3 dispositivos
- Piconet Bluetooth - 4 a 7 dispositivos
- Red Wifi Mobile Hotspot - 8 o más dispositivos.

## Capítulo 5: Modelos de energía requerida y disponible

### 5.1 Resumen

En este capítulo se presentan dos modelos para utilizar en zonas rurales aisladas, uno para estimar la energía requerida para ejecutar tareas de uso frecuente en estas zonas y otro para determinar la energía por hora disponible en una zona.

En primer lugar se desarrolla el modelo de energía requerida (modelo de consumo), considerando los siguientes aspectos:

|                   |  |
|-------------------|--|
| $T_1$             | Tarea de uso frecuente en zona rural   |
| $App_1$           | Aplicación de menor consumo para realizar la tarea $T_1$                         |
| $r$               | Cantidad de veces que se va a repetir la tarea                                   |
| $p_s$             | Potencia promedio que consume el dispositivo en modo <i>standby</i>              |
| $t_s$             | Tiempo que el dispositivo consume energía en modo <i>standby</i>                 |
| $p_1$             | Potencia promedio que utiliza la aplicación $App_1$ para realizar la tarea $T_1$ |
| $t_1$             | Tiempo utilizado para realizar la tarea $T_1$ , ejecutando $App_1$               |
| $e_s = p_s * t_s$ | Energía utilizada en modo <i>standby</i> , sin ejecutar aplicaciones             |
| $e_1 = p_1 * t_1$ | Energía que requiere la aplicación $App_1$ para realizar la tarea $T_1$          |

Al valor de la energía requerida para ejecutar  $T_1$  con  $App_1$  ( $e_1$ ) se debe agregar el consumo adicional de energía que introducen las características propias de la zona rural aislada (parámetros de la zona) y multiplicar el resultado por la cantidad de repeticiones:

$$e_1 = (e_1 + f\_energia(e_1, parametros\_de\_la\_zona)) \times r$$

Luego se agrega el consumo del celular en *standby*:

$$e_{Total} = e_s + (e_1 + f\_energia(e_1, parametros\_de\_la\_zona)) \times r \quad (1)$$

A continuación, se desarrolla el modelo de energía disponible por hora, en función de la energía solar de la zona.

|           |  |
|-----------|--|
| HSP       | Horas solares pico por día en la zona para un mes determinado (Se obtiene de mapa solar) |
| $p_{max}$ | Potencia máxima que entrega panel (en condiciones estándar, STC)                         |
| $\phi_i$  | factor de proporción de energía para la hora $i$   |

La energía disponible para la hora  $i$  se calcula con la siguiente expresión:

$$e_i = HSP \times p_{max} \times \phi_i \quad (2)$$

Se presentan dos técnicas para calcular el factor de proporción  $\phi$ , la primera en función de la radiación solar y la segunda en función de la potencia que entrega el panel.

Seguidamente, se vinculan las expresiones (1) y (2) para obtener las horas en las que la energía disponible alcanza para ejecutar la tarea  $T$ :

$$e_{Total} + m \leq e_i$$

Donde:

|             |  |
|-------------|--|
| $e_{Total}$ | Energía total requerida para la tarea T                                |
| $m$         | margen de error (15% de la energía requerida $0,15 \times e_{Total}$ ) |
| $e_i$       | energía disponible para la hora i                                      |

Finalmente, se generaliza el modelo para n Tareas:

$$e_{Total} = e_s + \sum_{j=1}^n e_j$$

$$e_{Total} + m \leq e_i$$

|             |   |
|-------------|---|
| $e_{Total}$ | Energía requerida para ejecutar las tareas $T_1, T_2 \dots T_n$       |
| $m$         | margen de error (10% de la energía requerida $0,1 \times e_{Total}$ ) |
| $e_i$       | energía disponible para la hora i                                     |

## 5.2 Consumo energético

En la Figura 5-1 se ilustra el consumo energético para ejecutar una tarea de uso frecuente en zona rural, la energía utilizada para realizar la tarea es la integral de la potencia en función del tiempo.

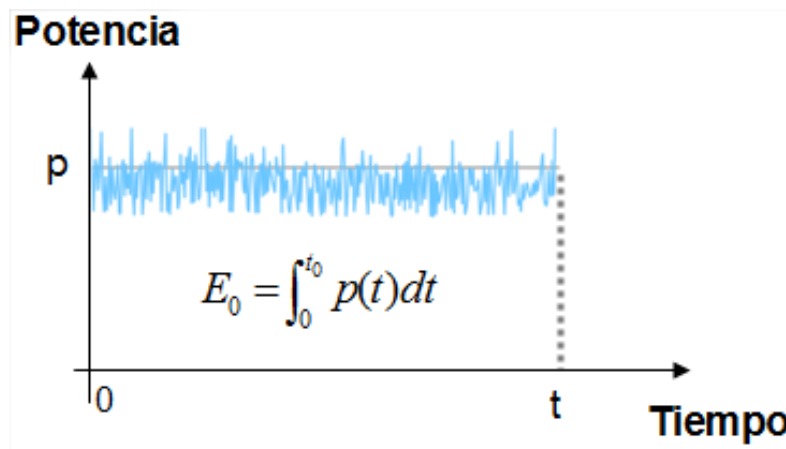


Figura 5-1: Consumo energético de una tarea

La energía se puede aproximar multiplicando el tiempo de ejecución de una tarea ( $t$ ) y la potencia promedio ( $p$ ). Para obtener la potencia promedio se utiliza una herramienta de medición (Profiler), que mide la potencia ( $P_i$ ) en “n” instantes de tiempo y promedia los valores obtenidos (Figura 5-2). Mientras más grande sea el valor de “n”, mejor será la aproximación a la integral de la potencia.

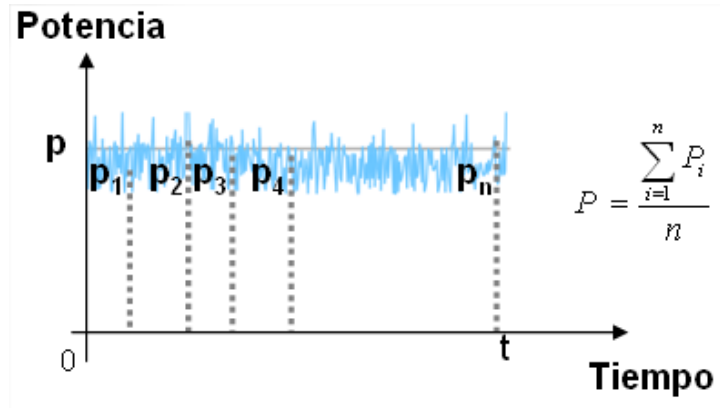


Figura 5-2: Cálculo de la potencia promedio

La energía, entonces, depende del tiempo y de la potencia. Esto significa que un incremento de tiempo y/o potencia generará un mayor consumo de energía. A continuación se analizan ambos casos por separado.

### 5.2.1 Incremento de energía producido por incremento de tiempo

Para ejemplificar, supongamos el siguiente escenario:

T - Tarea a realizar (Ej.: Navegación WEB)

App - Aplicación para ejecutar la tarea (Ej.: Mint)

Usuario<sub>0</sub> – Usuario con nivel de manejo de celular alto

Usuario<sub>1</sub> – Usuario con nivel de manejo de celular bajo

Casos de prueba - Los usuarios (Usuario<sub>0</sub> y Usuario<sub>1</sub>) realizan la tarea T utilizando la aplicación App en el mismo celular y con igual configuración.

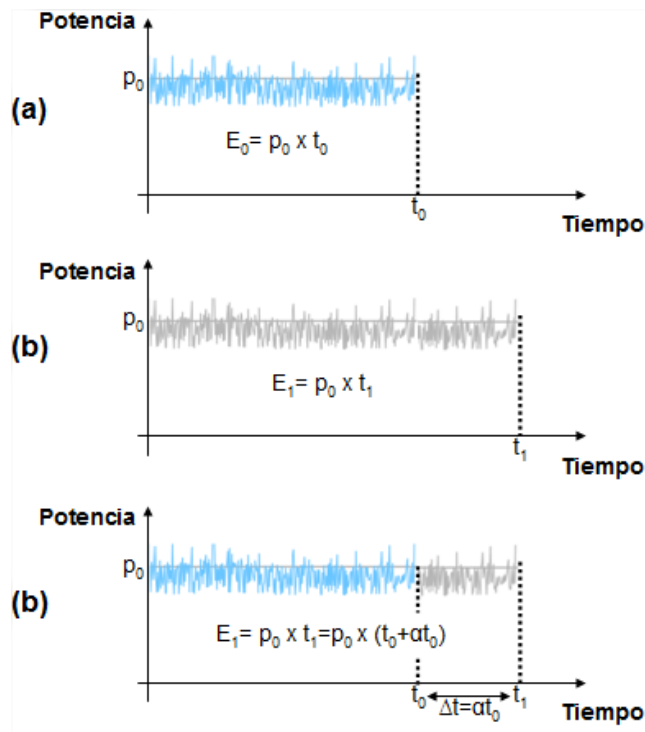


Figura 5-3: Incremento de tiempo

En la Figura 5-3 se ilustra el incremento de energía producido por incremento de tiempo, donde:

“ $t_0$ ” es el tiempo que le toma realizar la tarea T al **usuario<sub>0</sub>** y “ $t_1$ ” es el tiempo que le toma realizar una tarea T al **usuario<sub>1</sub>**. La potencia promedio será igual a “ $P_0$ ” para ambos casos ya que utilizan la misma la misma configuración de dispositivo. Entonces, la energía utilizada por el usuario<sub>0</sub> será  $E_0 = p_0 \times t_0$  y por el usuario<sub>1</sub> será  $E_1 = p_0 \times t_1$

“ $t_1$ ” se puede expresar en función de  $t_0$  ( $t_1 = t_0 + \Delta t$ ), donde  $\Delta t$  representa el tiempo adicional utilizado. A su vez,  $\Delta t$  se puede obtener como una proporción de  $t_0$  utilizando una tasa de incremento  $\alpha$ , si  $\Delta t = \alpha t_0$  entonces  $t_1 = t_0 + \alpha t_0$ . La energía en este caso se calcula con la expresión  $E_1 = p_0 \times (t_0 + \alpha t_0)$ .

El modelo desarrollado permite calcular la tasa  $\alpha$  en función de parámetros que afectan al tiempo de ejecución de la tarea, como la capacidad de manejo del usuario y el nivel de interacción de la aplicación. Entonces, conociendo valores de referencia de tiempo ( $t_0$ ) y potencia ( $p_0$ ) y parámetros de ejecución, se puede estimar el consumo de energía para la ejecución de la tarea con diferentes parámetros:

usuario<sub>0</sub> -> tiempo ( $t_0$ ) y potencia ( $p_0$ )

usuario<sub>1</sub> ->  $\alpha = f(\text{parámetros}) = f(\text{capacidad de manejo, nivel de interacción})$

Energía (usuario<sub>1</sub>) =  $p_0 \times (t_0 + \alpha t_0)$

## 5.2.2 Incremento de energía producido por incremento de potencia

Para ejemplificar, supongamos el siguiente escenario:

T - Tarea (Ej.: descarga de contenidos WEB)

App - Aplicación para realizar la tarea (Ej.: Mint)

Brillo<sub>0</sub> - Nivel de brillo bajo

Brillo<sub>1</sub> - Nivel de brillo alto

Casos de prueba: La tarea T es ejecutada por el mismo usuario utilizando la aplicación App en el mismo celular con dos niveles de brillo diferentes (Brillo<sub>0</sub> y Brillo<sub>1</sub>)

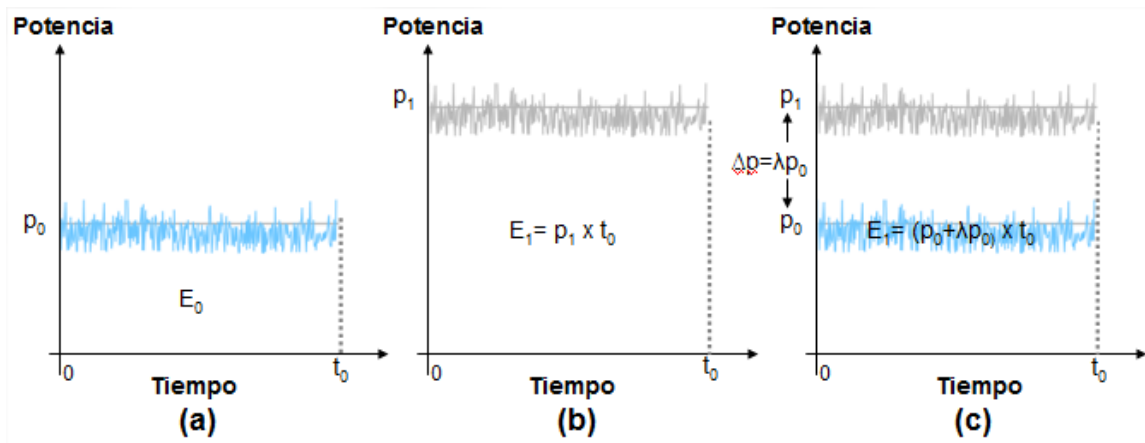


Figura 5-4: Incremento de potencia

En la Figura 5-4 se ilustra el incremento de energía producido por incremento de tiempo, donde:

“ $p_0$ ” es la potencia promedio para realizar la tarea T con un nivel de brillo bajo y “ $p_1$ ” es el tiempo que le toma realizar una tarea T con un nivel de brillo alto. El tiempo se mantiene constante “ $t_0$ ” ya que la tarea es ejecutada por el mismo usuario. Entonces, la energía utilizada con brillo1 será  $E_0 = p_0 \times t_0$  y con brillo2 será  $E_1 = p_1 \times t_0$

“ $p_1$ ” se puede expresar en función de  $p_0$  ( $p_1 = p_0 + \Delta p$ ), donde  $\Delta p$  representa la potencia adicional utilizada por el cambio de brillo. A su vez,  $\Delta p$  se puede obtener como una proporción de  $p_0$  utilizando una tasa de incremento  $\lambda$ , si  $\Delta p = \lambda p_0$  entonces  $p_1 = p_0 + \lambda t_0$ . La energía en este caso se calcula con la expresión  $E_1 = (p_0 + \lambda p_0) \times t_0$ .

El modelo desarrollado en este trabajo permite calcular la tasa  $\lambda$  en función de parámetros que afectan a la potencia consumida, como la gama del dispositivo y el nivel de brillo utilizado. Entonces, conociendo valores de referencia de tiempo ( $t_0$ ) y potencia ( $p_0$ ) y ciertos parámetros de ejecución, se puede estimar el consumo de energía para la ejecución de la tarea con diferentes parámetros:

Usuario<sub>0</sub> -> tiempo ( $t_0$ ) y potencia ( $p_0$ )

Usuario<sub>1</sub> ->  $\lambda = f(\text{parámetros}) = f(\text{gama de dispositivo, brillo de pantalla})$

Energía (usuario<sub>1</sub>) =  $(p_0 + \lambda p_0) \times t_0$

### 5.3 Construcción del modelo de energía requerida

Este modelo permite calcular el consumo adicional de energía que introducen parámetros que representan características propias de las zonas rurales aisladas. Estos se dividen en dos grupos:

- Parámetros que afectan al tiempo de ejecución de la tarea, como la capacidad de manejo del usuario y el nivel de interacción de la aplicación.
- Parámetros que afectan a la potencia consumida, como la gama del dispositivo y el nivel de brillo utilizado.

Conociendo valores de referencia de tiempo ( $t_0$ ) y potencia ( $p_0$ ) y parámetros de ejecución, se puede estimar el consumo de energía para la ejecución de la tarea con diferentes parámetros:

Usuario<sub>0</sub> -> tiempo ( $t_0$ ) y potencia ( $p_0$ ) (Valores de referencia)

Usuario<sub>1</sub> ->  $\alpha = f(\text{parámetros que modifican el tiempo})$

$= f(\text{capacidad de manejo, nivel de interacción})$

$\lambda = g(\text{parámetros que modifican la potencia})$

$= g(\text{gama de dispositivo, nivel de brillo})$

Energía (usuario<sub>1</sub>) =  $(p_0 + \lambda p_0) \times (t_0 + \alpha t_0)$

### 5.3.1 Modificación del tiempo de ejecución.

Se eligieron los siguientes parámetros que afectan al tiempo:

- Capacidad de manejo del usuario “C” (1=Alta, 2=Media, 3=Baja)
- Nivel de interacción de la aplicación “I” (1=Bajo, 2=Medio, 3=Alto)

Para realizar las pruebas, se seleccionaron tres tareas (de uso frecuente en zona rural) con distintos niveles de interacción:

| Interacción | Tarea                      | Aplicación |
|-------------|----------------------------|------------|
| Baja        | Consulta Web               | Mint       |
| Media       | Navegación Web interactiva | Mint       |
| Alta        | Mensajería instantánea     | Whatsapp   |

Estas tareas fueron ejecutadas por usuarios de zonas rurales con diferente capacidad de manejo de celular (Alta, Media, Baja), utilizando un dispositivo de gama baja y un nivel de brillo bajo. Los tiempos de ejecución obtenidos para cada combinación de parámetros (Interacción, Capacidad) fueron promediados y se muestran en la siguiente tabla, expresados en segundos:

|                 | Capacidad (C) de Manejo |           |          |
|-----------------|-------------------------|-----------|----------|
| Interacción (I) | Alta (1)                | Media (2) | baja (3) |
| Bajo (1)        | 300,00                  | 543,00    | 768,00   |
| Medio (2)       | 576,00                  | 819,00    | 1044,00  |
| Alto (3)        | 1206,00                 | 1452,00   | 1674,00  |

Ejemplos:

- El tiempo promedio para realizar una tarea con nivel de interacción bajo ejecutada por usuarios con capacidad de manejo alta ( $I_{bajo}$ ,  $C_{alta}$ ) es de 300 segundos.
- El tiempo promedio para realizar una tarea con nivel de interacción medio ejecutada por usuarios con capacidad de manejo media ( $I_{bajo}$ ,  $C_{media}$ ) es de 819 segundos.

Si tomamos el tiempo de la mejor combinación ( $I_{bajo}$ ,  $C_{alta}$ ) como tiempo de referencia ( $t_0$ ). A partir de este tiempo, se puede calcular la proporción adicional de tiempo ( $\alpha$ ) que introduce el cambio de capacidad de manejo (C) y/o interacción en la aplicación (I):

| Capacidad (C)   | alta (1) |          | Media (2) |          | baja (3) |          |
|-----------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| Interacción (I) | t        | $\alpha$ | t         | $\alpha$ | t        | $\alpha$ |
| Baja (1)        | 300,00   | 0,00     | 543,00    | 0,81     | 768,00   | 1,56     |
| Media (2)       | 576,00   | 0,92     | 819,00    | 1,73     | 1044,00  | 2,48     |
| Alta (3)        | 1206,00  | 3,02     | 1452,00   | 3,84     | 1674,00  | 4,58     |

Ejemplo:

La combinación ( $I_{media}$ ,  $C_{media}$ ) introduce 1,73 veces más de tiempo respecto a  $t_0$ . El tiempo de ejecución para esa combinación se puede calcular de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo } (I_{media}, C_{media}) = t_0 + (t_0 \times 1,73) = 300 + (300 \times 1,73) = 819s.$$

El factor  $\alpha$  se puede calcular en función de la proporción de tiempo que introduce el nivel de interacción ( $\alpha_1$ ) y la proporción de tiempo que introduce la capacidad de manejo del usuario ( $\alpha_2$ ):  $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$



| Capacidad(C)   | Alta (1)  | Media (2)   | Baja (3)  |
|----------------|---|---|---|
| Interacción(I) | $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$                          | $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$                                      | $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$                                      |
| Baja (1)       | $\alpha=0+0\approx 0$<br>$\alpha_1=0$ y $\alpha_2=0$    | $\alpha=0+0,81\approx 0,8$<br>$\alpha_1=0$ y $\alpha_2=0,8$         | $\alpha=0+1,56\approx 1,6$<br>$\alpha_1=0$ y $\alpha_2=1,6$         |
| Media (2)      | $\alpha=0,92+0\approx 1$<br>$\alpha_1=1$ y $\alpha_2=0$ | $\alpha=0,92+0,81=1,73\approx 1,8$<br>$\alpha_1=1$ y $\alpha_2=0,8$ | $\alpha=0,92+1,56=2,48\approx 2,5$<br>$\alpha_1=1$ y $\alpha_2=1,6$ |
| Alta (3)       | $\alpha=3,02+0\approx 3$<br>$\alpha_1=3$ y $\alpha_2=0$ | $\alpha=3,02+0,81=3,83\approx 4$<br>$\alpha_1=3$ y $\alpha_2=0,8$   | $\alpha=3,02+1,56=4,58\approx 4,6$<br>$\alpha_1=3$ y $\alpha_2=1,6$ |

Redondeando valores es posible encontrar:

- Una función que relacione el nivel de interacción (I) con  $\alpha_1$ .

|       | I | $\alpha_1$ | Función empírica           |
|-------|---|------------|----------------------------|
| Bajo  | 1 | 0          | $\alpha_1 = 2^{(I-1)} - 1$ |
| Medio | 2 | 1          |                            |
| Alto  | 3 | 3          |                            |

- Una función que relacione la capacidad de manejo del usuario con  $\alpha_2$ .

|       | C | $\alpha_2$ | Función empírica                |
|-------|---|------------|---------------------------------|
| Alta  | 1 | 0          | $\alpha_2 = \frac{4}{5}(C - 1)$ |
| Media | 2 | 0,8        |                                 |
| Baja  | 3 | 1,6        |                                 |

Conociendo el tiempo de referencia ( $t_1$ ) se puede estimar el tiempo de ejecución para cualquier combinación de nivel de interacción de la aplicación (I) y capacidad de manejo (C):

$$t = t_1 + (\alpha \times t_1); \text{ con } \alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

$\alpha_1$  se calcula aplicando la función empírica asociada al nivel de interacción (I)

$\alpha_2$  se calcula aplicando la función empírica asociada a la capacidad de manejo (C)

Ejemplos:

- La aplicación utilizada presenta un nivel de interacción medio y el usuario tiene una capacidad de manejo medio. El par ( $I_{\text{media}}$ ,  $C_{\text{media}}$ ) tiene un coeficiente  $\alpha=3$ , que indica que el tiempo de ejecución de la tarea será 3 veces el tiempo de referencia.
- La aplicación utilizada presenta un nivel de interacción medio y el usuario tiene una capacidad de manejo baja. El par ( $I_{\text{alta}}$ ,  $C_{\text{baja}}$ ) tiene un coeficiente  $\alpha=8$ , que indica que el tiempo de ejecución de la tarea será 3 veces el tiempo de referencia.

### 5.3.2 Modificación de la potencia

Se eligieron los siguientes parámetros que afectan a la potencia:

- Gama del dispositivo “G” (1=Baja, 2=Media, 3=Alta).
- Nivel de Brillo “B” (1=Bajo, 2=Medio, 3=Alto).

En primer lugar se debe determinar la potencia promedio utilizada para ejecutar una tarea. Esto implica seleccionar la aplicación que menos energía utilice para realizar la tarea (eficiencia energética). A continuación se resume el procedimiento utilizado:

1. Seleccionar tarea de uso frecuente en la zona rural  
Tarea T: Navegación WEB (nivel de interacción bajo)
2. Asignar aplicaciones móviles para ejecutar la tarea.  
Aplicaciones – App<sub>1</sub>: Focus App<sub>2</sub>: Chrome, App<sub>3</sub>: Opera Mini y App<sub>4</sub>: Mint
3. Establecer la potencia en modo *Standby* (Ps).
4. Determinar la potencia promedio que demanda cada aplicación para ejecutar la tarea  
p(app<sub>1</sub>)=1632mW, p(app<sub>2</sub>)=1549mW, p(app<sub>3</sub>)=1720mW y p(app<sub>4</sub>)=1470mW
5. Elegir la aplicación que demande menor potencia promedio para realizar la tarea (eficiencia energética), en este caso: App<sub>4</sub> Mint (1470 mW)
6. Ejecutar la tarea T, en dispositivos de gama baja media y alta (Tabla 5-1) y con diferentes niveles de brillo (Alto, Medio, Bajo), utilizando la aplicación seleccionada en el punto anterior (App<sub>1</sub>). En la Tabla 5-2 se indica la potencia promedio expresada en mili Watts (mW) para cada combinación:

| Gama  | Chipset                 | Dispositivo                     |
|-------|-------------------------|---------------------------------|
| Baja  | Qualcomm Snapdragon 435 | Xiaomi Redmi Y1 (Note 5A)       |
| Media | Qualcomm Snapdragon 635 | Xiaomi Mi A2 Lite (Redmi 6 Pro) |
| Alta  | Qualcomm Snapdragon 835 | Xiaomi Mi 6                     |

Tabla 5-1: Dispositivos utilizados

|           | Nivel de Brillo (B) |           |          |
|-----------|---------------------|-----------|----------|
| Gama (G)  | Bajo (1)            | Medio (2) | Alto (3) |
| Baja (1)  | 1549                | 1878      | 2161     |
| Media (2) | 1845                | 2198      | 2505     |
| Alta (3)  | 2509                | 2822      | 3077     |

Tabla 5-2: Potencia promedio para cada combinación Brillo/Gama

Ejemplos:

- La potencia promedio demandada por la aplicación App<sub>1</sub> para realizar una tarea T en un dispositivo de gama alta con nivel de brillo bajo (Gama<sub>alta</sub>, Brillo<sub>bajo</sub>) es 2474 mW.
- La potencia promedio demandada por la aplicación App<sub>1</sub> para realizar una tarea T en un dispositivo de gama alta con nivel de brillo alto (Gama<sub>alta</sub>, Brillo<sub>alto</sub>) es 3075 mW.

7. Calcular la tasa de proporción  $\lambda$   
Se utilizó la potencia consumida por la combinación (Gama<sub>baja</sub>, Brillo<sub>bajo</sub>) como potencia de referencia (P<sub>0</sub>=1549). A partir de este valor, se calculó la proporción adicional de potencia ( $\lambda$ ) que introduce el cambio de gama (G) y/o brillo (B):

|           | Nivel de Brillo (B) |           |           |           |          |           |
|-----------|---------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|           | Bajo (1)            |           | Medio (2) |           | Alto (3) |           |
| Gama(G)   | P                   | $\lambda$ | P         | $\lambda$ | P        | $\lambda$ |
| Baja (1)  | 1549                | 0         | 1878      | 0,212     | 2161     | 0,395     |
| Media (2) | 1845                | 0,191     | 2198      | 0,419     | 2505     | 0,617     |
| Alta (3)  | 2509                | 0,620     | 2822      | 0,822     | 3077     | 0,986     |

Tabla 5-3: Proporción adicional de potencia

Ejemplo:

La combinación (Gama<sub>media</sub>, Brillo<sub>medio</sub>) consume 1,415 veces más de potencia respecto a la potencia de referencia. La potencia para esa combinación se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_0: \text{Potencia (Gama}_{\text{media}}, \text{Brillo}_{\text{medio}}) = P_0 + (P_0 \times 0,41) = 2192$$

El procedimiento explicado fue utilizado para caracterizar la potencia promedio de un conjunto de tareas de uso frecuente en zonas rurales (Tabla 5-4). La lista de tareas surge de un relevamiento realizado en diferentes zonas rurales aisladas del NOA. Las aplicaciones se seleccionaron en función de los siguientes criterios: Ser gratuitas y de libre distribución, no ser propietarias ni desarrolladas por un fabricante para un determinado modelo de celular, tener un gran número de descargas y calificaciones positivas.

| Tarea                       | Aplicaciones para realizar la tarea                    | Aplicación de menor consumo |
|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Navegación Web              | Google Chrome, Firefox focus, Opera Mini, Mint browser | Mint browser                |
| Envío de SMS                | Google Android Messages, Handcent SMS, Chomp SMS       | Handcent SMS                |
| Acceso a correo electrónico | Gmail, Microsoft Outlook, Blue mail                    | Gmail                       |
| Mensajería instantánea      | Whatsapp, Facebook Messenger, Google Hangout           | Whatsapp                    |
| Geoposicionamiento          | GPS status, GPS Essentials, GPS test                   | GPS status                  |
| Navegación GPS              | Google maps, Waze, Maps.me                             | Maps.me                     |
| Captura de fotografías      | Camera MX, Wondershare Powercam, Open Camera           | Open Camera                 |
| Filmación de videos         | Cinema FV-5, Wondershare Powercam, Open camera         | Open camera                 |
| Reproducción de audio       | MX player, VLC player, KMPlayer                        | VLC player                  |
| Reproducción de video       | MX player, VLC player, KMPlayer                        | VLC player                  |

Tabla 5-4: Tareas de uso frecuente en zona rural y aplicaciones para ejecutarla

Para cada tarea se determinaron los valores de  $\lambda$  para las combinaciones de gama brillo.

| Tarea                       | App          | $\lambda$ para las combinaciones de Gama Brillo (G, B) |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------|--------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                             |              | (1,1)  | (1,2) | (1,3) | (2,1) | (2,2) | (2,3) | (3,1) | (3,2) | (3,3) |
| Navegación Web              | Mint browser | 0  | 0,201 | 0,374 | 0,183 | 0,405 | 0,593 | 0,581 | 0,784 | 0,925 |
| Envío de SMS                | Chomp SMS    | 0  | 0,191 | 0,378 | 0,176 | 0,388 | 0,569 | 0,543 | 0,766 | 0,905 |
| Acceso a correo electrónico | Gmail        | 0  | 0,207 | 0,408 | 0,201 | 0,444 | 0,652 | 0,619 | 0,870 | 1,043 |
| Mensajería instantánea      | Whatsapp     | 0  | 0,194 | 0,370 | 0,175 | 0,390 | 0,569 | 0,567 | 0,759 | 0,909 |
| Geoposicionamiento          | GPS status   | 0  | 0,221 | 0,399 | 0,194 | 0,427 | 0,637 | 0,610 | 0,840 | 1,013 |
| Navegación GPS              | Maps.me      | 0  | 0,230 | 0,406 | 0,197 | 0,432 | 0,644 | 0,830 | 0,849 | 1,039 |
| Captura de fotografías      | Open Camera  | 0  | 0,223 | 0,394 | 0,192 | 0,423 | 0,626 | 0,616 | 0,845 | 1,018 |
| Filmación de videos         | Open camera  | 0  | 0,235 | 0,412 | 0,203 | 0,448 | 0,658 | 0,636 | 0,853 | 1,045 |
| Reproducción de audio       | VLC player   | 0  | 0,196 | 0,380 | 0,183 | 0,398 | 0,591 | 0,582 | 0,771 | 0,921 |
| Reproducción de video       | VLC player   | 0  | 0,215 | 0,421 | 0,204 | 0,422 | 0,619 | 0,610 | 0,844 | 0,999 |
| PROMEDIO                    |              | 0  | 0,212 | 0,395 | 0,191 | 0,419 | 0,617 | 0,620 | 0,822 | 0,986 |

Los valores de  $\lambda$  obtenidos fueron promediados para obtener el valor medio de proporción para cada combinación (Gama, Brillo) y se muestran en la Tabla 5-5.

| $\lambda$ | Nivel de Brillo (B) |           |          |
|-----------|---------------------|-----------|----------|
| Gama (G)  | Bajo (1)            | Medio (2) | Alto (3) |
| Baja (1)  | 0                   | 0,212     | 0,395    |
| Media (2) | 0,191               | 0,419     | 0,617    |
| Alta (3)  | 0,620               | 0,822     | 0,986    |

Tabla 5-5: Valor medio de la tasa de incremento de potencia  $\lambda$

La tasa  $\lambda$  se puede calcular en función de la proporción de potencia que introduce el cambio de gama de dispositivo ( $\lambda_1$ ) y la proporción de potencia que introduce el nivel de brillo del dispositivo ( $\lambda_2$ ):  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$

| Brillo(B) | Bajo (1)   | Medio (2)  | Alto (3)   |
|-----------|--|--|--|
| Gama(G)   | $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$                              | $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$                                | $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$                                |
| Baja (1)  | $\lambda=0 \approx 0$<br>$\lambda_1=0$ y $\lambda_2=0$         | $\lambda=0,212 \approx 0,2$<br>$\lambda_1=0$ y $\lambda_2=0,2$   | $\lambda=0,395 \approx 0,4$<br>$\lambda_1=0$ y $\lambda_2=0,4$   |
| Media (2) | $\lambda=0,191 \approx 0,2$<br>$\lambda_1=0,2$ y $\lambda_2=0$ | $\lambda=0,419 \approx 0,4$<br>$\lambda_1=0,2$ y $\lambda_2=0,2$ | $\lambda=0,617 \approx 0,6$<br>$\lambda_1=0,2$ y $\lambda_2=0,4$ |
| Alta (3)  | $\lambda=0,620 \approx 0,6$<br>$\lambda_1=0,6$ y $\lambda_2=0$ | $\lambda=0,822 \approx 0,8$<br>$\lambda_1=0,6$ y $\lambda_2=0,2$ | $\lambda=0,986 \approx 1$<br>$\lambda_1=0,6$ y $\lambda_2=0,4$   |

Tabla 5-6:  $\lambda$  en función de  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$

Redondeando valores se encuentra:

- Una función que relacione la gama de dispositivo (G) con  $\lambda_1$ :

|       | G | $\lambda_1$ | Función empírica                |
|-------|---|-------------|---------------------------------|
| Baja  | 1 | 0           | $\lambda_1 = \frac{G(G-1)}{10}$ |
| Media | 2 | 0,2         |                                 |
| Alta  | 3 | 0,6         |                                 |

- Una función que relacione el nivel de brillo (B) con  $\lambda_2$ :

|       | B | $\lambda_2$ | Función empírica                |
|-------|---|-------------|---------------------------------|
| Bajo  | 1 | 0           | $\lambda_2 = \frac{2B - 2}{10}$ |
| Medio | 2 | 0,2         |                                 |
| Alto  | 3 | 0,4         |                                 |

En función de la potencia de referencia ( $p_0$ ) se estima la potencia que requiere cualquier combinación de Gama de dispositivo (G) y nivel de brillo (B):

$$p = p_0 + (\lambda \times p_0); \text{ Con } \lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

$\lambda_1$  se calcula aplicando la función empírica asociada a la gama del dispositivo (G)

$\lambda_2$  se calcula aplicando la función empírica asociada al nivel de brillo (B)

### 5.3.3 Energía requerida

A partir de 5.3.1 y 5.3.2, la energía se calcula con la siguiente expresión:

$$E = p \times t = (p_0 + \lambda p_0) \times (t_1 + \alpha t_1) \text{ Donde } \alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \text{ y } \lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

### 5.3.4 Criterios para tipificar los parámetros

#### 5.3.4.1 Nivel de interacción de una aplicación

En la Tabla 5-7 se presentan las métricas utilizadas para medir el nivel de interacción de una aplicación cuando se ejecuta una tarea en el dispositivo móvil.

| Tipo de interacción                | Métrica  | Nivel de interacción |          |      |
|------------------------------------|--|----------------------|----------|------|
|                                    |  | Bajo                 | Medio    | Alto |
| Interacción con la pantalla        | Número de pantallas desplegadas por minuto   | 1 a 3                | 4 a 8    | >8   |
| Interacción con el teclado virtual | Cantidad de clics sobre objetos de navegación (botones, menús, desplazamiento, iconos, etc.) por minuto. | 1 a 5                | 6 a 15   | >15  |
|                                    | Cantidad de caracteres escritos por minuto.  | 1 a 29               | 30 a 120 | >120 |

Tabla 5-7: Métricas para el nivel de interacción de una aplicación

La medición del nivel de interacción debe ser realizada por un usuario con capacidad de manejo “alta”, utilizando el siguiente procedimiento:

- Configurar un dispositivo móvil para ejecutar las pruebas
  - Desinstalar las aplicaciones no indispensables para su funcionamiento. Detener procesos en segundo plano. Deshabilitar dispositivos de hardware no utilizados. Deshabilitar actualizaciones. Cargar la batería al 80%.
- Seleccionar la tarea a realizar y la aplicación con que se ejecutará.

- Ejecutar la tarea en el dispositivo móvil utilizando la aplicación seleccionada. Durante la ejecución de la tarea, medir:
  - Tiempo que le toma al usuario realizar la tarea ( $t_1$  en segundos)
  - Número de pantallas desplegadas (pantallas)
  - Cantidad de clics sobre objetos de navegación (clics)
  - Cantidad de caracteres escritos, sin usar teclado predictivo (caracteres)
- Normalizar los valores a 60 segundos

Pantallas x minuto =  $(60 \times \text{pantallas}) / t_1$

Clics x minuto =  $(60 \times \text{clics}) / t_1$

Caracteres x minuto =  $(60 \times \text{caracteres}) / t_1$

Asignar a la aplicación un nivel de interacción en función de los rangos de valores para cada métrica de la Tabla 5-7. En caso de obtener diferentes niveles para el nivel de interacción, elegir el nivel más elevado.

Ejemplo:

Tarea: Mensajería instantánea (chat Whatsapp)

Tiempo de tarea =  $t_1 = 180$  segundos

Número de pantallas desplegadas = 27

Cantidad de clics sobre objetos de navegación = 34

Cantidad de caracteres escritos, sin usar teclado predictivo = 412

Pantallas x minuto =  $(60 \times 27) / 180 = 9$  ( $>8 \Rightarrow$  Alto)

Clics x minuto =  $(60 \times 34) / 180 = 11,33 \approx 12$  (6 a 15  $\Rightarrow$  Medio)

Caracteres x minuto =  $(60 \times 412) / t_1 = 137,33 \approx 138$  ( $>120 \Rightarrow$  Alto)

En este ejemplo la aplicación tendrá un nivel de interacción “Alto”.

En la Tabla 5-8 se presentan niveles de interacción para las aplicaciones utilizadas para ejecutar tareas de uso frecuente en zonas rurales aisladas. Estos valores fueron obtenidos utilizando el procedimiento presentado en este apartado.

| Tarea                          | Aplicación   | Nivel de interacción |
|--------------------------------|--------------|----------------------|
| Mensajería instantánea         | Whatsapp     | Alto                 |
| Navegación web interactiva     | Mint         | Alto                 |
| Navegación web consulta        | Mint         | Bajo                 |
| Envío de SMS                   | Handcent SMS | Medio                |
| Correo electrónico (escritura) | Gmail        | Alto                 |
| Correo electrónico (lectura)   | Gmail        | Bajo                 |
| Geoposicionamiento             | GPS status   | Bajo                 |
| Navegación GPS                 | Maps.me      | Medio                |
| Captura de fotografías         | Open Camera  | Bajo                 |
| Filmación de videos            | Open camera  | Bajo                 |
| Reproducción de audio          | VLC player   | Bajo                 |
| Reproducción de video          | VLC player   | Bajo                 |

Tabla 5-8: Nivel de interacción para tareas de uso frecuente en zonas rurales aisladas

#### 5.3.4.2 Capacidad de manejo de un usuario

Resulta muy complicado tipificar la capacidad de manejo de un usuario, ya que depende de factores humanos como el nivel de concentración, estado de ánimo y otros. Sin embargo, se propone el siguiente procedimiento:

- Seleccionar usuarios.  
Usuario1: Usuario de referencia. Capacidad de manejo alta ( $C=0$ )  
UsuarioN: Usuario a tipificar. Capacidad de manejo a determinar.
- Elegir una tarea a realizar y una aplicación para ejecutar la misma.
- Ejecutar la tarea  
En primer lugar, y para establecer los valores de referencia, la tarea debe ser ejecutada por el usuario de referencia en un dispositivo de Gama baja ( $G=0$ ) y utilizando un nivel de brillo bajo ( $B=0$ ). Durante la ejecución de la tarea, medir el tiempo que le toma al usuario realizar la tarea:  $t_1$  - Tiempo de referencia para realizar la tarea  
A continuación la misma prueba debe ser realizada por el UsuarioN. Durante la ejecución de la tarea, medir el tiempo que le toma al usuario realizar la tarea:  $t_n$  - Tiempo del usuario a tipificar.
- Calcular el factor de proporción  $(t_n/t_1)-1$ , que indica cuanto más de tiempo introduce el UsuarioN respecto del Usuario1.
- Asignar al usuario la categoría a la que más se aproxime.  
Según el modelo de energía requerida, un usuario de capacidad media demora aproximadamente 0,8 veces más de tiempo y un usuario de capacidad baja introduce aproximadamente 1,6 veces más de tiempo.

Ejemplos:

- $T1 = 71s$ ,  $TN = 179$ , el factor del usuario N será 1,52 y está cercano a 1,6, por lo que se le asigna capacidad baja.
- $T1 = 71s$ ,  $TN = 142$ , el factor del usuario N será 1,01 y está cercano a 0,8, por lo que se le asigna capacidad media.
- $T1 = 71s$ ,  $TN = 75$ , el factor del usuario N será 0,05 y está cercano a 0, por lo que se le asigna capacidad alta.

#### 5.3.4.3 Gama de un dispositivo

A pesar de que no existen datos o especificaciones precisas para identificar la gama de los teléfonos celulares, resulta necesario establecerlos para orientar a los usuarios en la valoración de cada dispositivo.

Existen usuarios para cada tipo de teléfonos celulares. No todos desean tener el celular más avanzado, y esto es algo que conocen muy bien las compañías fabricantes de estos dispositivos. Por eso es que desarrollan móviles con características distintas.

No se debe confundir gama con calidad, la calidad de un teléfono celular inteligente no está determinada por la gama. Cuando una empresa fabrica un smartphone lo hace con componentes de calidad, independientemente de la gama. La diferencia radica en las

características o utilidades que tenga cada dispositivo móvil, lo cual se ve reflejado en forma directa en el precio del dispositivo: a mayor gama mayor precio.

Se establecen tres gamas o categorías para ubicar de manera más exacta a los smartphones por sus funcionalidades y componentes: Alta, Media y Baja. Por lo general son los mismos fabricantes los que especifican la gama de cada dispositivo que fabrican y la publican en su página web.

### **Gama Alta**

En este nivel se encuentran los teléfonos celulares considerados como emblemáticos de cada empresa fabricante, Ejemplos: Samsung Galaxy S10, LG G6, Xiaomi MI6, entre otros. Estos equipos están dotados con los elementos más evolucionados de la telefonía móvil y reúnen todas las características, componentes, avances, tendencias e innovaciones que proporciona la tecnología móvil para el momento de su lanzamiento, en lo concerniente a: tamaño de pantalla, chipset, procesador y frecuencia de funcionamiento, acceso a redes de alta velocidad, conectividad, versión del sistema operativo, memoria RAM, capacidad de la batería, además de la cámara fotográfica y video.

### **Gama Media**

Los smartphones de media gama se caracterizan por tener pantallas de calidad, pero de menor tamaño, resolución y profundidad de píxeles por pulgada; en la mayoría de los casos funcionan con una versión anterior a la más actual de su sistema operativo; los procesadores no tienen la potencia de los que encontramos en gamas superiores, y las cámaras fotográficas generalmente cuentan con menos cantidad de megapíxeles.

### **Gama Baja**

En esta categoría se encuentran los celulares con plataformas que no dan soporte a muchas utilidades que tienen los teléfonos de otras gamas. Sus pantallas son de escasas dimensiones y resolución, cuentan con procesadores de bajo rendimiento, disponen de poca memoria RAM, y sus cámaras no llegan al Megapíxel, entre otros aspectos. Se diferencian de los teléfonos básicos, por el hecho de permitir funcionalidades que van más allá de llamar y recibir llamadas.

#### **5.3.4.4 Nivel de Brillo de la pantalla**

La percepción del brillo surge como una comparación entre el brillo emitido en relación a la cantidad de luz ambiente y los reflejos. Si un usuario utiliza el celular a la intemperie en un día soleado, puede pensar que la pantalla brilla poco aunque el nivel de brillo se encuentre al máximo, el mismo nivel de brillo en un día nublado o por la noche seguramente deslumbrará al usuario, quien probablemente piense que la pantalla brilla demasiado. En entornos muy iluminados, el usuario se verá forzado a elevar el factor de brillo de la pantalla de su dispositivo para poder ver con claridad el contenido; esto no es lo más recomendable ya que se pierde nitidez en las zonas oscuras de la pantalla y en los colores. Además, si se utiliza un nivel de brillo elevado de forma continua y por periodos de tiempo largos, se puede producir un daño irreparable en la visión del usuario.

Existen 3 maneras de regular el brillo:



- Mediante el uso de una aplicación móvil se puede crear una tabla de horarios, asignando un valor de brillo determinado según la franja horaria que deseemos. Este método es muy eficaz, ya que permite personalizar el nivel de brillo que más convenga. Como contrapartida, se puede decir que esta forma de programar el brillo no tiene en cuenta las condiciones de luz ambientales. Es decir, el sistema no contempla que el día pueda estar nublado, por lo que siempre emplea valores de brillo predeterminados.
- Utilizando los sensores de brillo que muchos dispositivos incorporan en sus pantallas para que, de forma totalmente automática, se regule el nivel de brillo en función de las condiciones de lumínicas ambientales.
- En forma manual, es el usuario el que regula el nivel de brillo en función de las condiciones de luminosidad de la zona y su comodidad visual.

Para aprovechar la energía solar disponible en las zonas rurales, los usuarios utilizan sus dispositivos móviles en horas de sol pleno y alta luminosidad, regulando el nivel de brillo en función del lugar de trabajo. Un ejemplo: las aulas de las escuelas rurales. Son ambientes amplios con ventanales de gran tamaño, lo que hace que cuenten con una elevada luminosidad, ideal para realizar muchas de las actividades educativas. Sin embargo, si se requiere el uso de dispositivos móviles, estas condiciones no son adecuadas, ya que los alumnos tienen que usar los equipos con niveles de brillo altos. Para evitar esto, se utilizan cortinas que atenúan la luminosidad del aula, así los estudiantes utilizan los celulares con niveles de brillo medio o bajo que demandan una cantidad menor de energía.

### 5.3.5 Validación del modelo

Para validar el modelo de consumo se realizaron pruebas y mediciones con la participación de usuarios con diferentes capacidades de manejo, que ejecutaron tareas con distintos niveles de interacción, utilizando dispositivos de diferente gama con distintos niveles de brillo. Se contemplaron todas la combinaciones de parámetros de la Tabla 5-9:  $I, C, G, B = 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  casos.

| Parámetro                                 | Valores posibles        | Cantidad |
|---|-------------------------|----------|
| Nivel de interacción de la Aplicación (I) | Bajo=1, Medio=2, Alto=3 | 3        |
| Capacidad de manejo del usuario (C)       | Alta=1, Media=2, Baja=3 | 3        |
| Gama del dispositivo (G)                  | Baja=1, Media=2, Alta=3 | 3        |
| Nivel de Brillo (B)                       | Bajo=1, Medio=2, Alto=3 | 3        |

Tabla 5-9: Parámetros del modelo de consumo de energía

#### Tareas ejecutadas

- Navegación web en modo interactivo con alto nivel de interacción alto, utilizando la aplicación Mint.
- Navegación web en modo interactivo con un nivel de interacción medio, utilizando la aplicación Mint.
- Navegación web en modo consulta utilizando la aplicación Mint.

Cada tarea se ejecutó 5 veces en un lapso de 15 minutos, de esta forma se consideraron posibles variaciones de tiempo de ejecución.

## Usuarios

Participaron alumnos y profesores de las escuelas rurales aisladas seleccionadas (apartado 3.1.1) y alumnos avanzados de la Licenciatura en Análisis de Sistemas (LAS) de la Universidad Nacional de Salta. En cada escuela se seleccionaron aleatoriamente usuarios con diferentes capacidades de manejo (Alta, Media, Baja).

## Dispositivos móviles

Se utilizaron los dispositivos de gama Alta, Media y Baja especificados en la Tabla 5-1. Todos fueron adquiridos con fondos proporcionados por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa), que financió esta investigación.

Antes de realizar cada prueba se realizó una carga previa para asegurar que la batería del dispositivo se encuentre en un nivel de carga inicial del 50%.

## Brillo de la pantalla

Se configuraron manualmente niveles de brillo bajo, medio y alto, en los dispositivos utilizados para realizar las pruebas.

## Casos de prueba

En cada caso de prueba, de 81 posibles, se procedió a determinar los desvíos que surgen de comparar el consumo estimado (del modelo) y el consumo medido (multímetro).

El consumo estimado se calculó aplicando el modelo de consumo en función de los parámetros (I C G B) del caso.

El consumo medido, se obtuvo utilizando un multímetro USB (Apartado 2.4.3.1.2). Este equipo detectó, en distintos instantes de tiempo, los valores de tensión y corriente entregados a un dispositivo móvil por un panel fotovoltaico. El Multímetro almacenó los valores en un archivo de texto (log), con el siguiente formato: (Hora, Tensión V en voltios, Corriente I en amperios). Al finalizar la prueba, se procesaron los datos del archivo “log” para obtener la energía utilizada (Wh), utilizando el siguiente algoritmo:

N: cantidad de registros en el LOG

Registro i-ésimo: (H<sub>i</sub>, V<sub>i</sub>, I<sub>i</sub>)

H<sub>ini</sub>: Hora inicial

H<sub>fin</sub>: Hora final

$$Potencia\_promedio = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i \times V_i)}{N} ; \text{ Donde } H_{ini} \leq H_i \leq H_{fin}$$

$$Energía\_consumida = Potencia\_promedio \times (H_{fin} - H_{ini})$$

En la Tabla 5-10 se muestran los desvíos obtenidos y el porcentaje de error para todos los casos. Estos valores se calcularon de la siguiente manera:

$$Desvio = Estimado - Medido$$

$$\%error = \frac{Desvio}{Medido}$$

| Caso | I | C | G | B | Estimado<br>(en Wh) | Medido<br>(en Wh) | Desvío | %Error |
|------|---|---|---|---|---------------------|-------------------|--------|--------|
| 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,237               | 0,253             | 0,017  | -6,54% |
| 2    | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,272               | 0,282             | 0,009  | -3,32% |
| 3    | 1 | 1 | 1 | 3 | 0,307               | 0,300             | -0,007 | 2,46%  |
| 4    | 1 | 1 | 2 | 1 | 0,609               | 0,649             | 0,040  | -6,17% |
| 5    | 1 | 1 | 2 | 2 | 0,644               | 0,589             | -0,054 | 9,24%  |
| 6    | 1 | 1 | 2 | 3 | 0,679               | 0,633             | -0,046 | 7,21%  |
| 7    | 1 | 1 | 3 | 1 | 1,330               | 1,453             | 0,123  | -8,45% |
| 8    | 1 | 1 | 3 | 2 | 1,366               | 1,463             | 0,098  | -6,68% |
| 9    | 1 | 1 | 3 | 3 | 1,401               | 1,359             | -0,042 | 3,07%  |
| 10   | 1 | 2 | 1 | 1 | 0,378               | 0,354             | -0,024 | 6,93%  |
| 11   | 1 | 2 | 1 | 2 | 0,442               | 0,413             | -0,029 | 6,98%  |
| 12   | 1 | 2 | 1 | 3 | 0,505               | 0,524             | 0,019  | -3,61% |
| 13   | 1 | 2 | 2 | 1 | 1,032               | 1,131             | 0,099  | -8,73% |
| 14   | 1 | 2 | 2 | 2 | 1,096               | 1,149             | 0,053  | -4,64% |
| 15   | 1 | 2 | 2 | 3 | 1,160               | 1,119             | -0,041 | 3,63%  |
| 16   | 1 | 2 | 3 | 1 | 2,319               | 2,291             | -0,029 | 1,25%  |
| 17   | 1 | 2 | 3 | 2 | 2,383               | 2,350             | -0,033 | 1,41%  |
| 18   | 1 | 2 | 3 | 3 | 2,446               | 2,674             | 0,228  | -8,52% |
| 19   | 1 | 3 | 1 | 1 | 0,519               | 0,537             | 0,017  | -3,19% |
| 20   | 1 | 3 | 1 | 2 | 0,611               | 0,591             | -0,020 | 3,35%  |
| 21   | 1 | 3 | 1 | 3 | 0,703               | 0,723             | 0,020  | -2,76% |
| 22   | 1 | 3 | 2 | 1 | 1,456               | 1,357             | -0,099 | 7,33%  |
| 23   | 1 | 3 | 2 | 2 | 1,548               | 1,657             | 0,109  | -6,59% |
| 24   | 1 | 3 | 2 | 3 | 1,640               | 1,546             | -0,094 | 6,10%  |
| 25   | 1 | 3 | 3 | 1 | 3,308               | 3,334             | 0,026  | -0,79% |
| 26   | 1 | 3 | 3 | 2 | 3,400               | 3,460             | 0,060  | -1,73% |
| 27   | 1 | 3 | 3 | 3 | 3,492               | 3,580             | 0,088  | -2,47% |
| 28   | 2 | 1 | 1 | 1 | 0,413               | 0,397             | -0,017 | 4,21%  |
| 29   | 2 | 1 | 1 | 2 | 0,484               | 0,455             | -0,029 | 6,30%  |
| 30   | 2 | 1 | 1 | 3 | 0,555               | 0,524             | -0,030 | 5,76%  |
| 31   | 2 | 1 | 2 | 1 | 1,138               | 1,182             | 0,043  | -3,67% |
| 32   | 2 | 1 | 2 | 2 | 1,209               | 1,182             | -0,027 | 2,28%  |
| 33   | 2 | 1 | 2 | 3 | 1,280               | 1,308             | 0,029  | -2,20% |
| 34   | 2 | 1 | 3 | 1 | 2,566               | 2,572             | 0,006  | -0,24% |
| 35   | 2 | 1 | 3 | 2 | 2,637               | 2,614             | -0,023 | 0,89%  |
| 36   | 2 | 1 | 3 | 3 | 2,708               | 2,811             | 0,103  | -3,66% |
| 37   | 2 | 2 | 1 | 1 | 0,555               | 0,559             | 0,004  | -0,79% |
| 38   | 2 | 2 | 1 | 2 | 0,654               | 0,618             | -0,035 | 5,72%  |
| 39   | 2 | 2 | 1 | 3 | 0,753               | 0,823             | 0,071  | -8,60% |
| 40   | 2 | 2 | 2 | 1 | 1,562               | 1,682             | 0,120  | -7,12% |
| 41   | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,661               | 1,567             | -0,094 | 5,98%  |
| 42   | 2 | 2 | 2 | 3 | 1,760               | 1,788             | 0,028  | -1,58% |
| 43   | 2 | 2 | 3 | 1 | 3,555               | 3,829             | 0,274  | -7,15% |

| Caso | I | C | G | B | Estimado<br>(en Wh) | Medido<br>(en Wh) | Desvío | %Error |
|------|---|---|---|---|---------------------|-------------------|--------|--------|
| 44   | 2 | 2 | 3 | 2 | 3,654               | 3,305             | -0,350 | 10,58% |
| 45   | 2 | 2 | 3 | 3 | 3,753               | 3,717             | -0,036 | 0,97%  |
| 46   | 2 | 3 | 1 | 1 | 0,696               | 0,656             | -0,040 | 6,16%  |
| 47   | 2 | 3 | 1 | 2 | 0,823               | 0,835             | 0,011  | -1,37% |
| 48   | 2 | 3 | 1 | 3 | 0,950               | 0,888             | -0,062 | 6,97%  |
| 49   | 2 | 3 | 2 | 1 | 1,986               | 1,907             | -0,079 | 4,16%  |
| 50   | 2 | 3 | 2 | 2 | 2,113               | 2,112             | -0,001 | 0,06%  |
| 51   | 2 | 3 | 2 | 3 | 2,240               | 2,382             | 0,141  | -5,93% |
| 52   | 2 | 3 | 3 | 1 | 4,544               | 4,417             | -0,128 | 2,89%  |
| 53   | 2 | 3 | 3 | 2 | 4,671               | 4,284             | -0,387 | 9,04%  |
| 54   | 2 | 3 | 3 | 3 | 4,799               | 4,466             | -0,333 | 7,45%  |
| 55   | 3 | 1 | 1 | 1 | 0,767               | 0,704             | -0,062 | 8,86%  |
| 56   | 3 | 1 | 1 | 2 | 0,908               | 0,975             | 0,067  | -6,88% |
| 57   | 3 | 1 | 1 | 3 | 1,049               | 0,960             | -0,089 | 9,28%  |
| 58   | 3 | 1 | 2 | 1 | 2,198               | 2,227             | 0,029  | -1,32% |
| 59   | 3 | 1 | 2 | 2 | 2,339               | 2,492             | 0,153  | -6,13% |
| 60   | 3 | 1 | 2 | 3 | 2,481               | 2,502             | 0,021  | -0,85% |
| 61   | 3 | 1 | 3 | 1 | 5,039               | 4,619             | -0,420 | 9,10%  |
| 62   | 3 | 1 | 3 | 2 | 5,180               | 5,501             | 0,321  | -5,83% |
| 63   | 3 | 1 | 3 | 3 | 5,321               | 5,161             | -0,160 | 3,10%  |
| 64   | 3 | 2 | 1 | 1 | 0,908               | 0,864             | -0,044 | 5,05%  |
| 65   | 3 | 2 | 1 | 2 | 1,077               | 1,168             | 0,090  | -7,74% |
| 66   | 3 | 2 | 1 | 3 | 1,247               | 1,260             | 0,013  | -1,05% |
| 67   | 3 | 2 | 2 | 1 | 2,622               | 2,440             | -0,181 | 7,43%  |
| 68   | 3 | 2 | 2 | 2 | 2,791               | 2,805             | 0,013  | -0,48% |
| 69   | 3 | 2 | 2 | 3 | 2,961               | 3,167             | 0,206  | -6,50% |
| 70   | 3 | 2 | 3 | 1 | 6,028               | 6,219             | 0,191  | -3,07% |
| 71   | 3 | 2 | 3 | 2 | 6,197               | 5,873             | -0,324 | 5,52%  |
| 72   | 3 | 2 | 3 | 3 | 6,367               | 6,434             | 0,067  | -1,04% |
| 73   | 3 | 3 | 1 | 1 | 1,049               | 0,962             | -0,087 | 9,08%  |
| 74   | 3 | 3 | 1 | 2 | 1,247               | 1,127             | -0,120 | 10,69% |
| 75   | 3 | 3 | 1 | 3 | 1,445               | 1,408             | -0,036 | 2,59%  |
| 76   | 3 | 3 | 2 | 1 | 3,046               | 3,261             | 0,215  | -6,60% |
| 77   | 3 | 3 | 2 | 2 | 3,243               | 2,934             | -0,310 | 10,56% |
| 78   | 3 | 3 | 2 | 3 | 3,441               | 3,552             | 0,111  | -3,13% |
| 79   | 3 | 3 | 3 | 1 | 7,017               | 7,593             | 0,576  | -7,59% |
| 80   | 3 | 3 | 3 | 2 | 7,215               | 7,803             | 0,588  | -7,54% |
| 81   | 3 | 3 | 3 | 3 | 7,412               | 7,935             | 0,523  | -6,59% |

Tabla 5-10: Consumo estimado vs Consumo medido

Se observa que el porcentaje de error máximo positivo (10,69%) se encuentra en el caso 74, mientras que el porcentaje de error máximo negativo en el caso 13 (-8,73%). A continuación, ambos casos se analizan por separado:

- Caso 74: El consumo estimado esta 10,69% por encima del medido (Sobra Energía). El remanente de energía puede ser acumulado en la batería del dispositivo.
- Caso 13: El consumo estimado esta 8,73% por debajo del medido. (Falta Energía). Este porcentaje de error es contemplado más adelante, en la variable margen de error “m” del modelo ( $m=0,15$  o 15%).

## 5.4 Construcción del modelo de energía disponible

Para calcular la energía disponible se requiere la radiación solar que se puede obtener desde un mapa solar. A modo de ejemplo en la Figura 5-5 y Tabla 5-11 se presenta información tomada de los datos de radiación de SISOL [48] para la ciudad de Salta Capital:

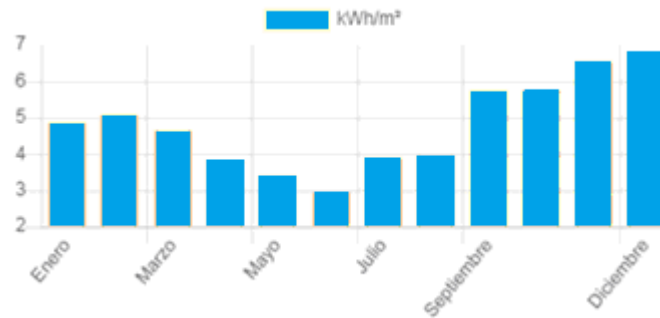


Figura 5-5: Potencia recibida del sol por unidad de superficie  
Fuente SISOL[48]

| Mes        | HSP |
|------------|-----|
| Enero      | 4,9 |
| Febrero    | 5,0 |
| Marzo      | 4,7 |
| Abril      | 3,8 |
| Mayo       | 3,4 |
| Junio      | 3,0 |
| Julio      | 3,9 |
| Agosto     | 4,0 |
| Septiembre | 5,7 |
| Octubre    | 5,8 |
| Noviembre  | 6,3 |
| Diciembre  | 6,5 |

Tabla 5-11: Radiación solar en Salta Capital

En un día claro de febrero, se esperan 5 kWh de potencia por cada metro cuadrado, que equivalen a 5 horas con una radiación pico de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Estos valores se obtienen cercanos al mediodía solar, que en el caso de Salta para esa época del año es la hora 13:30. En la Figura 5-6 se presenta un gráfico de radiación solar sobre plano horizontal para ese día, la radiación está representada (aproximadamente) por el área que se encuentra debajo de la curva, se observa que la mayor parte de la misma está concentrada alrededor del mediodía solar de 11 a 16 ( $13:30 \pm 2,5$ ).

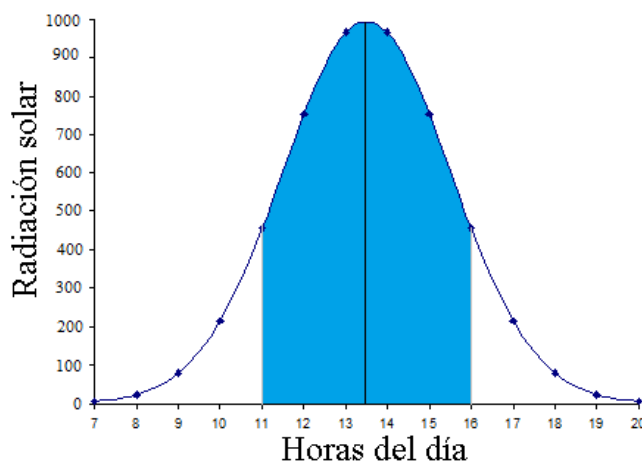


Figura 5-6: Mediodía solar

Un panel solar fotovoltaico que entregue una potencia máxima de 10W a una radiación estándar de 1000 W/m<sup>2</sup>. En 5 horas solares pico día, entregará: 10Wx5h=50Wh en el transcurso del día. Considerando que la temperatura de celda se mantuviese en el valor de referencia (25°C).

Este valor (50Wh), teóricamente puede representar:

- 5 horas de 10W
- 6 horas de 8,33W
- 7 horas de 7,14 W
- 8 horas de 6,25
- 2 horas de 10W y 4 de 7,5 W

Lo que significa que el valor de horas solares de una zona, tomado de un mapa solar, no alcanza para determinar cuánto del total de la energía disponible corresponde a cada hora del día. Para obtener esta distribución aquí se utiliza un factor de proporción para cada hora, este factor se puede calcular en función de la radiación solar o de la potencia entregada por el panel.

#### 5.4.1 Cálculo de la energía por hora a partir de la radiación solar

A continuación se describe paso a paso el procedimiento para determinar los factores de proporción a partir de la radiación solar.,

- Utilizando un Piranómetro<sup>3</sup>, medir la radiación solar para cada hora con sol del día (9 a 18, en el caso de Salta).

| Hora      | 9              | 10              | 11              | 12              | 13              | 14              | 15              | 16              | 17              | 18              |
|-----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Radiación | r <sub>9</sub> | r <sub>10</sub> | r <sub>11</sub> | r <sub>12</sub> | r <sub>15</sub> | r <sub>16</sub> | r <sub>17</sub> | r <sub>16</sub> | r <sub>17</sub> | r <sub>18</sub> |

- Calcular la radiación promedio por hora  $rp_i = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$

| Franja horaria  | 9-10            | 10-11            | 11-12            | 12-13            | 13-14            | 14-15            | 15-16            | 16-17            | 17-18            |
|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Radiación Media | rp <sub>9</sub> | rp <sub>10</sub> | rp <sub>11</sub> | rp <sub>12</sub> | rp <sub>13</sub> | rp <sub>14</sub> | rp <sub>15</sub> | rp <sub>16</sub> | rp <sub>17</sub> |

<sup>3</sup> Instrumento meteorológico utilizado para medir la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra.

- Obtener la radiación acumulada para el día:  $r_d = \sum_{i=9}^{17} rp_i$

Este valor debería estar muy cercano a la radiación obtenida a partir de los datos de un mapa solar:  $r_d = \sum_{i=9}^{17} rp_i \approx HSP \times 1000 \text{ W/mt}^2$

- Calcular el factor de proporción de radiación para cada hora del día:  $\varphi_i = \frac{rp_i}{r_d}$

| Franja horaria       | 9-10                   | 10-11                        | 11-12                        | 12-13                        | 13-14                        | 14-15                        | 15-16                        | 16-17                        | 17-18                        |
|----------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Radiación Media      | $rp_9$                 | $rp_{10}$                    | $rp_{11}$                    | $rp_{12}$                    | $rp_{13}$                    | $rp_{14}$                    | $rp_{15}$                    | $rp_{16}$                    | $rp_{17}$                    |
| Factor de proporción | $\varphi_9 = rp_9/r_d$ | $\varphi_{10} = rp_{10}/r_d$ | $\varphi_{11} = rp_{11}/r_d$ | $\varphi_{12} = rp_{12}/r_d$ | $\varphi_{13} = rp_{13}/r_d$ | $\varphi_{14} = rp_{14}/r_d$ | $\varphi_{15} = rp_{15}/r_d$ | $\varphi_{16} = rp_{16}/r_d$ | $\varphi_{17} = rp_{17}/r_d$ |

Utilizando estos factores, se puede determinar la energía para una hora i en la zona elegida:

$$e_i = HSP \times p_{\max} \times \varphi_i$$

Donde:

HSP: horas solares del día (tomadas de mapa solar de la zona)

$p_{\max}$ : potencia máxima que entrega panel (en condiciones estándar, STC)

$\varphi_i$ : factor de proporción de radiación para la hora i

**Ejemplo:** Cálculo de factores de proporción para Salta Capital para un día claro de febrero, utilizando un panel de 3 filas en paralelo y 12 celdas en serie por fila (3x12) que entrega una potencia máxima de 10W en condiciones estándar de tiempo (STC).

En primer lugar se obtienen los valores de radiación para cada hora:

| Hora      | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Radiación | 100 | 240 | 460 | 750 | 930 | 930 | 615 | 460 | 240 | 100 |

La radiación se distribuye de la siguiente manera en el transcurso del día:



Figura 5-7: Radiación por hora del día

Luego se calcula la radiación promedio para cada hora  $rp_i = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$ :

$$rp_9 = \frac{r_{10} + r_{11}}{2} = \frac{240 + 460}{2} = 350 \quad \dots \quad rp_{17} = \frac{r_{18} + r_{19}}{2} = \frac{140 + 250}{2} = 195$$

| Franja horaria  | 9-10 | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Radiación Media | 170  | 350   | 605   | 840   | 930   | 772,5 | 537,5 | 350   | 170   |

La radiación acumulada para el día, será:  $r_{dia} = \sum_{i=9}^{18} rp_i = 4860 Wh / m^2$

Se verifica que el valor obtenido  $4860 Wh/m^2 = 4,86 kWh/m^2$  es cercano al valor del mapa solar para un día del mes de febrero en Salta Capital:  $5 kWh/m^2$  (fuente: SISOL)

Finalmente, se calculan los factores de proporción de radiación para cada hora:  $\varphi_i = \frac{rp_i}{r_{dia}}$  y

la energía por hora:  $e_i = HSP \times p_{max} \times \varphi_i$

| Franja horaria                       | 9-10  | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Radiación Media                      | 170   | 350   | 605   | 840   | 930   | 840   | 605   | 350   | 170   |
| Factor de proporción ( $\varphi_i$ ) | 0,03  | 0,07  | 0,12  | 0,17  | 0,19  | 0,17  | 0,12  | 0,07  | 0,03  |
| Energía por hora ( $e_i$ )           | 1,749 | 3,601 | 6,224 | 8,642 | 9,568 | 8,642 | 6,224 | 3,601 | 1,749 |

#### 5.4.2 Cálculo de la energía por hora a partir de la potencia entregada

Si bien el piranómetro permite calcular los factores de proporción con mucha precisión, no siempre se dispone del mismo debido a su elevado costo, entre 700 y 2500 dólares según tecnología y calidad. En caso de no disponer de un dispositivo para medir la radiación solar, se pueden calcular los factores de proporción en base a la corriente y tensión que entrega el panel, utilizando un multímetro de bajo costo, siguiendo el siguiente procedimiento:

- Medir la corriente ( $I_i$ ) y la tensión ( $V_i$ ) a la salida del panel y establecer la potencia ( $P_i = I_i \times V_i$ ) entregada para cada hora del día:

| Hora     | 8     | 9     | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       | 16       | 17       | 18       |
|----------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| I        | $I_8$ | $I_9$ | $I_{10}$ | $I_{11}$ | $I_{12}$ | $I_{13}$ | $I_{14}$ | $I_{15}$ | $I_{16}$ | $I_{17}$ | $I_{18}$ |
| V        | $V_8$ | $V_9$ | $V_{10}$ | $V_{11}$ | $V_{12}$ | $V_{13}$ | $V_{14}$ | $V_{15}$ | $V_{16}$ | $V_{17}$ | $V_{18}$ |
| Potencia | $P_8$ | $P_9$ | $P_{10}$ | $P_{11}$ | $P_{12}$ | $P_{13}$ | $P_{14}$ | $P_{15}$ | $P_{16}$ | $P_{17}$ | $P_{18}$ |

Al medir en forma directa la tensión y la corriente se incorporan las variaciones producidas por cambios en la temperatura de la celda y no es necesario aplicar los coeficientes de intensidad-temperatura y tensión-temperatura.

- Calcular la potencia regulada (PR) entregada para cada hora del día.



Las baterías de los dispositivos operan de una forma segura dentro de los voltajes de funcionamiento designados; sin embargo, se vuelve inestable si se carga con una tensión superior a la especificada. Para evitar que ocurra esto, los celulares incorporan circuitos de protección que no permiten exceder el voltaje establecido (generalmente 3,7V). En consecuencia, es necesario diferenciar el voltaje que entrega el panel y el voltaje que efectivamente recibe la batería (voltaje regulado).

Para determinar el Voltaje Regulado en la hora  $i$  ( $VR_i$ ), aplicamos el siguiente algoritmo:

$$\begin{aligned} \text{Si } V_i > V_c \\ VR_i &= V_c \\ \text{Sino} \\ VR_i &= V_i \end{aligned}$$

Donde,  $V_c$  es el voltaje de carga de la batería y  $V_i$  es el voltaje que entrega el panel en la hora  $i$ .

En función del voltaje regulado (VR) se calcula la Potencia Regulada (PR) para cada hora:  $PR_i = I \times VR_i$

| Hora                                    | 8      | 9      | 10        | 11        | 12        | 13        | 14        | 15        | 16        | 17        | 18        |
|---|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Corriente (I)                           | $I_8$  | $I_9$  | $I_{10}$  | $I_{11}$  | $I_{12}$  | $I_{13}$  | $I_{14}$  | $I_{15}$  | $I_{16}$  | $I_{17}$  | $I_{18}$  |
| Voltaje (V)                             | $V_8$  | $V_9$  | $V_{10}$  | $V_{11}$  | $V_{12}$  | $V_{13}$  | $V_{14}$  | $V_{15}$  | $V_{16}$  | $V_{17}$  | $V_{18}$  |
| Voltaje Regulado (VR)                   | $VR_8$ | $VR_9$ | $VR_{10}$ | $VR_{11}$ | $VR_{12}$ | $VR_{13}$ | $VR_{14}$ | $VR_{15}$ | $VR_{16}$ | $VR_{17}$ | $VR_{18}$ |
| Potencia<br>$P = I \times V$            | $p_8$  | $p_9$  | $p_{10}$  | $p_{11}$  | $p_{12}$  | $p_{13}$  | $p_{14}$  | $p_{15}$  | $p_{16}$  | $p_{17}$  | $p_{18}$  |
| Potencia Regulada<br>$PR = I \times VR$ | $pr_8$ | $pr_9$ | $pr_{10}$ | $pr_{11}$ | $pr_{12}$ | $pr_{13}$ | $pr_{14}$ | $pr_{15}$ | $pr_{16}$ | $pr_{17}$ | $pr_{18}$ |

- Calcular la potencia promedio por hora:  $pp_i = \frac{p_i + p_{i+1}}{2}$
- Calcular la potencia regulada promedio por hora:  $ppr_i = \frac{pr_i + pr_{i+1}}{2}$
- Determinar la potencia acumulada para el día:  $p_d = \sum_{i=8}^{18} pp_i$
- Calcular el factor de proporción de energía para cada hora del día, en función de la potencia que el celular puede aprovechar (regulada):  $\varphi_i = \frac{ppr_i}{p_d}$

| Franja horaria             | 8-9                     | 9-10                    | 10-11                         | 11-12                         | 12-13                         | 13-14                         | 14-15                         | 15-16                         | 16-17                         | 17-18                         |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Potencia Promedio          | $Pp_8$                  | $pp_9$                  | $pp_{10}$                     | $pp_{11}$                     | $pp_{12}$                     | $pp_{13}$                     | $pp_{14}$                     | $pp_{15}$                     | $pp_{16}$                     | $pp_{17}$                     |
| Potencia Promedio Regulada | $ppr_8$                 | $ppr_9$                 | $ppr_{10}$                    | $ppr_{11}$                    | $ppr_{12}$                    | $ppr_{13}$                    | $ppr_{14}$                    | $ppr_{15}$                    | $ppr_{16}$                    | $ppr_{17}$                    |
| Factor de proporción       | $\varphi_8 = ppr_8/p_d$ | $\varphi_9 = ppr_9/p_d$ | $\varphi_{10} = ppr_{10}/p_d$ | $\varphi_{11} = ppr_{11}/p_d$ | $\varphi_{12} = ppr_{12}/p_d$ | $\varphi_{13} = ppr_{13}/p_d$ | $\varphi_{14} = ppr_{14}/p_d$ | $\varphi_{15} = ppr_{15}/p_d$ | $\varphi_{16} = ppr_{16}/p_d$ | $\varphi_{17} = ppr_{17}/p_d$ |

**Ejemplo:** Cálculo de factores de proporción para el paraje “El Rosal” en un día claro de Octubre, utilizando un panel Jiawei 10P (Tabla 2-12) que entrega una potencia máxima de 10W en condiciones estándar (STC).

Datos necesarios para realizar el cálculo:

- Horas Solar Pico de la zona = HSP = 6,9 (de SISOL).
- Potencia máxima que entrega el panel en STC = Pmax = 10W.
- Voltaje de carga de la batería = 3,7 V (de las especificaciones del fabricante)

En primer lugar se obtienen los pares I-V por hora, se promedian y se calcula la potencia entregada y la potencia regulada para cada hora:

| Horario                                  | 8-9   | 9-10  | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 | 18-19 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Corriente I                              | 0,23  | 0,31  | 0,41  | 0,46  | 0,53  | 0,59  | 0,51  | 0,43  | 0,39  | 0,29  | 0,21  |
| Voltaje V                                | 15,11 | 15,33 | 15,87 | 16,29 | 16,44 | 17,42 | 16,81 | 16,11 | 15,79 | 15,21 | 15,11 |
| Voltaje Regulado VR                      | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  |
| Potencia P (pp <sub>i</sub> )            | 3,48  | 4,75  | 6,51  | 7,49  | 8,71  | 10,28 | 8,57  | 6,93  | 6,16  | 4,41  | 3,17  |
| Potencia regulada PR (ppr <sub>i</sub> ) | 0,85  | 1,15  | 1,52  | 1,70  | 1,96  | 2,18  | 1,89  | 1,59  | 1,44  | 1,07  | 0,78  |

Se obtiene la potencia acumulada para el día:  $p_d = \sum_{i=8}^{18} pp_i = 70,46$

Se calculan los factores de proporción para cada hora:  $\varphi_i = \frac{ppr_i}{p_d}$  y la energía aprovechada

(utilizando regulador) por hora:  $e_i = HSP \times p_{\max} \times \varphi_i$

| Horario  | 8-9   | 9-10  | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 | 18-19 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Potencia regulada PR (ppr <sub>i</sub> )                     | 0,85  | 1,15  | 1,52  | 1,70  | 1,96  | 2,18  | 1,89  | 1,59  | 1,44  | 1,07  | 0,78  |
| Factor de proporción (ppr <sub>i</sub> /P <sub>d</sub> )     | 0,012 | 0,016 | 0,022 | 0,024 | 0,028 | 0,031 | 0,027 | 0,023 | 0,020 | 0,015 | 0,011 |
| Energía aprovechada (HSPx P <sub>max</sub> xφ <sub>i</sub> ) | 0,833 | 1,123 | 1,486 | 1,667 | 1,920 | 2,138 | 1,848 | 1,558 | 1,413 | 1,051 | 0,761 |

También es posible determinar la energía entregada por el panel (sin utilizar regulador).

Para ello se calculan los factores de proporción para cada hora:  $\varphi_i = \frac{pp_i}{p_d}$  y la energía por

hora:  $e_i = HSP \times p_{\max} \times \varphi_i$

| Horario  | 8-9   | 9-10  | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14  | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 | 18-19 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Potencia P (pp <sub>i</sub> )                              | 3,48  | 4,75  | 6,51  | 7,49  | 8,71  | 10,28  | 8,57  | 6,93  | 6,16  | 4,41  | 3,17  |
| Factor de proporción (pp <sub>i</sub> /P <sub>d</sub> )    | 0,049 | 0,067 | 0,092 | 0,106 | 0,124 | 0,146  | 0,122 | 0,098 | 0,087 | 0,063 | 0,045 |
| Energía entregada (HSPx P <sub>max</sub> xφ <sub>i</sub> ) | 3,403 | 4,654 | 6,372 | 7,338 | 8,533 | 10,065 | 8,395 | 6,784 | 6,030 | 4,319 | 3,107 |

En la Figura 5-8 se presenta un gráfico que muestra la energía aprovechada del total entregado por el panel. El desperdicio se debe al uso del regulador de voltaje para no dañar la batería del dispositivo. Se evidencia que en el peor caso 2,138 de 10,06, se desaprovecha un 79% de la energía.

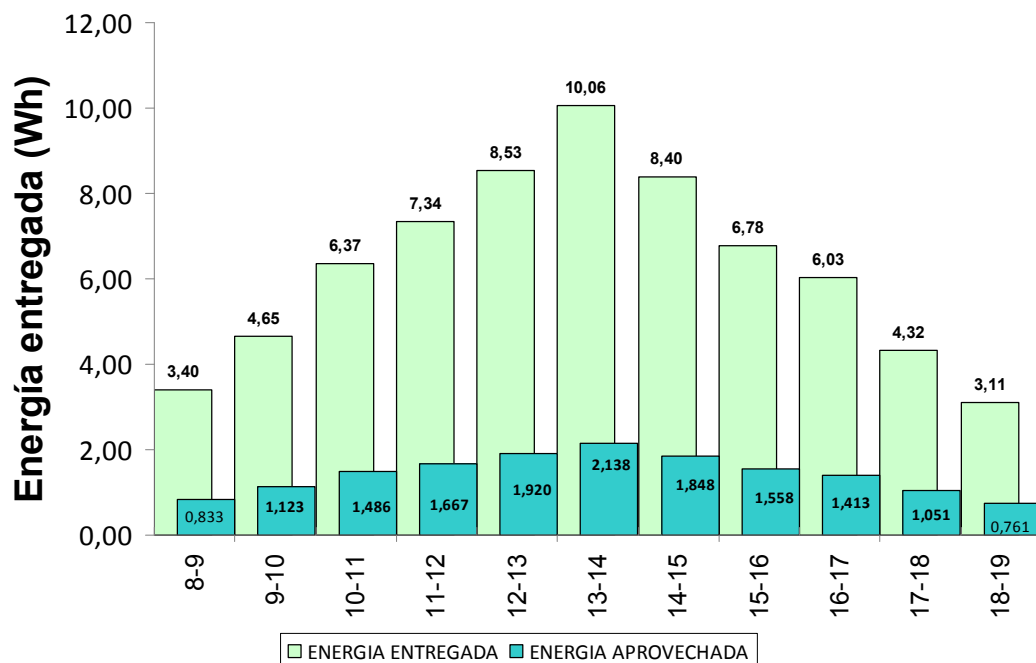


Figura 5-8: Energía entregada y aprovechada por hora del día

El procedimiento de cálculo de la energía por hora a partir de la potencia entregada, se puede automatizar utilizando un sensor de corriente monitoreado por una placa de control (Ej.: Arduino). La placa de control recolecta los datos del sensor y los almacena en una memoria SD en un LOG con el siguiente formato: (fecha y hora, corriente I, tensión V). Luego, los datos del LOG son leídos desde una computadora o celular (conectado a la placa de control), y son procesados para calcular el factor de proporción por hora del día en la zona. En el siguiente capítulo se presenta un prototipo (Figura 5-9) que implementa este procedimiento.

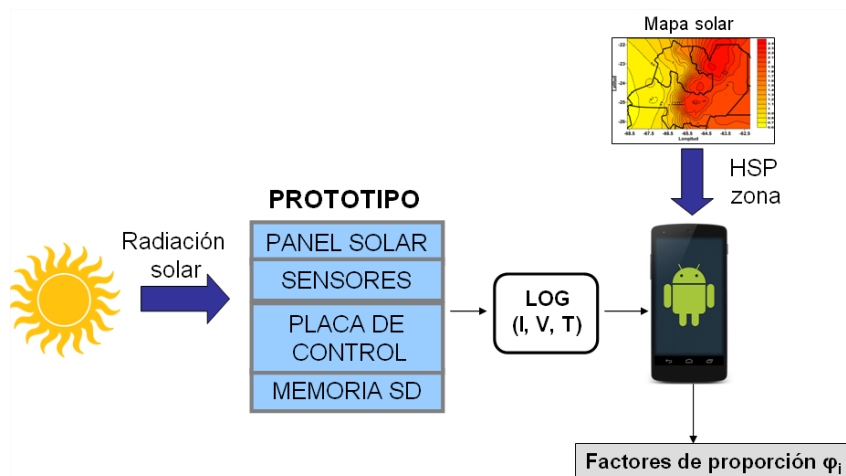


Figura 5-9: Esquema del prototipo

## 5.5 Vinculación del modelo de consumo y modelo de energía

Parámetros:

|  |                  |  |
|--|------------------|--|
| Tarea a realizar   | T                |  |
| Repeticiones   | r                | Cantidad de veces que se va a ejecutar la tarea T en una hora  |
| Aplicaciones para ejecutar la tarea                                    | App <sub>i</sub> | App <sub>1</sub> , App <sub>2</sub> , ... App <sub>n</sub>   |
| Aplicación de menor consumo para realizar la tarea T                   | App <sub>k</sub> | Com k tal que consumo(app <sub>k</sub> )=mínimo(c(App <sub>i</sub> )) i=1 ..n<br>Aplicar la metodología del apartado XX  |
| Tiempo(ms)   | t <sub>1</sub>   | Tiempo utilizado para realizar la tarea T utilizando la aplicación App <sub>k</sub>  |
| Potencia consumida(mW)   | p <sub>1</sub>   | Potencia consumida para realizar la tarea T utilizando la aplicación App <sub>k</sub>  |
| Potencia en modo <i>standby</i>  | p <sub>0</sub>   | Se caracteriza el consumo del dispositivo sin ejecutar aplicaciones  |
| Tiempo en modo <i>standby</i>  | t <sub>0</sub>   | Tiempo que el celular estará activo sin ejecutar aplicaciones  |
| Consumo de energía en modo <i>standby</i>                              | e <sub>s</sub>   | e <sub>s</sub> = t <sub>0</sub> x p <sub>0</sub>   |
| Nivel de interacción de la aplicación utilizada para realizar la tarea | I                | (Baja=1, Media=2, Alta=3)  |
| Capacidad de manejo del usuario  | C                | (Alta=1, Media=2, Baja=3)  |
| Brillo de pantalla requerido   | B                | (Bajo=1, Medio=2, Alto=3)  |
| Gama del dispositivo   | G                | (Baja=1, Media=2, Alta=3)  |
| Horas Solares Pico   | HSP              | Horas solares Pico de la zona (de mapa solar)  |
| Potencia máxima que entrega el panel                                   | p <sub>max</sub> | De las especificaciones técnicas del panel.  |
| Temperatura de trabajo para cada hora (8 a 17)                         | Ta <sub>i</sub>  | Ta <sub>8</sub> , Ta <sub>9</sub> , Ta <sub>10</sub> , Ta <sub>11</sub> , Ta <sub>12</sub> , Ta <sub>13</sub> , Ta <sub>14</sub> , Ta <sub>15</sub> , Ta <sub>16</sub> , Ta <sub>17</sub> , Ta <sub>18</sub> |
| Factor de proporción para cada hora (8 a 17)                           | φ <sub>i</sub>   | φ <sub>8</sub> , φ <sub>9</sub> , φ <sub>10</sub> φ <sub>11</sub> φ <sub>12</sub> φ <sub>13</sub> φ <sub>14</sub> φ <sub>15</sub> φ <sub>16</sub> φ <sub>17</sub> φ <sub>18</sub>                            |

Energía requerida para ejecutar la tarea T:  $e_T = (p_1 + \lambda p_1) \times (t_1 + \alpha t_1)$

Con:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2, \text{ con } \lambda_1 = \frac{G^2 - G}{10} \text{ y } \lambda_2 = \frac{2B - 2}{10}$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2, \text{ con } \alpha_1 = 2^{(I-1)} - 1 \text{ y } \alpha_2 = \frac{4}{5}(C - 1)$$

La energía total será:  $e_{Total} = e_s + (e_T \times r)$

Energía disponible para la hora i:

$$e_i = HSP \times p_{\max} \times \varphi_i; \text{ Donde } \varphi_i \text{ es el factor de proporción para la hora } i.$$

Energía disponible para la hora i considerando la temperatura:

$$e_i = HSP \times (p_{\max} + vpot_i) \times \varphi_i$$

Donde  $\phi_i$  es el factor de proporción para la hora  $i$  y  $v_{pot_i}$  la variación de la potencia para la hora  $i$ :

$$v_{pot_i} = v_{temp_i} \times 0,63mA \times -2,3mV$$

$$v_{temp_i} = T_{c_i} - T_{c_{i-1}} \text{ (Variación de temperatura para la hora } i \text{)}$$

Donde  $T_{c_i}$  es la temperatura de la celda en la hora  $i$ :

$$T_{c_i} = T_{a_i} + G \times \frac{TONC - 20}{800}$$

Horarios en los que se puede ejecutar la tarea, son las horas  $i$  en el intervalo [8 a 19] tal

$$\text{que: } e_{Total} + m \leq e_i$$

$e_{Total}$  – energía requerida para ejecutar  $r$  veces la tarea  $T$  en una hora

$m$  – margen de error ( $0,15 \times e_{Total}$ )

$e_i$  – energía disponible para la hora  $i$

### Margen de error

Las condiciones cambiantes de las zonas rurales aisladas y el comportamiento impredecible de sus pobladores cuando usan dispositivos móviles, pueden generar desvíos no previstos o parámetros no identificados que no hayan sido contemplados en la construcción del modelo. Para subsanar estos inconvenientes se incorporó en el modelo una variable (“ $m$ ”) que representa el margen de error.

Inicialmente se fijó este valor en un 15% de la energía requerida ( $e_{Total}$ ), valor que surge del error en la estimación al validar el modelo (apartado 5.3.5). Este valor se puede ajustar si, después de aplicar el modelo, se detectan remanentes de energía acumulada en la batería de los dispositivos.

## 5.6 Generalización del modelo de energía requerida para $n$ tareas

### Tareas a ejecutar y número de repeticiones por tarea:

$$T_1 r_1, T_2 r_2, \dots, T_n r_n$$

### Parámetros fijos:

C: Capacidad de manejo del usuario

B: Brillo de pantalla requerido

G: Gama del dispositivo

$e_s$ : Consumo de energía en modo *standby*

### Parámetros que se modifican según la aplicación:

$I_i$ : Nivel de interacción de la aplicación  $i$  utilizada para realizar la tarea  $i$

### Coefficiente fijo, en función de B y G:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2, \text{ con } \lambda_1 = \frac{G^2 - G}{10} \text{ y } \lambda_2 = \frac{2B - 2}{10}$$

**Coefficiente variable, en función de I y C:**

$$\alpha_k = \alpha_{1k} + \alpha_2, \text{ con } \alpha_{1k} = 2^{(I_k-1)} - 1 \text{ y } \alpha_2 = \frac{4}{5}(C-1)$$

A continuación se las actividades realizadas para la generalización del modelo:

|   |  |
|---|--|
| Seleccionar aplicaciones para ejecutar cada tarea   | $T_1 - \text{app}_{11}, \text{app}_{12} \dots \text{app}_{1m}$<br>$T_2 - \text{app}_{21}, \text{app}_{22} \dots \text{app}_{2m}$<br>.....<br>$T_n - \text{app}_{n1}, \text{app}_{n2} \dots \text{app}_{nm}$  |
| Establecer la aplicación de menor consumo para ejecutar cada tarea.                                     | $T_1 - \text{app}_{1k} \text{ tal que consumo}(\text{app}_{1k}) = \text{mínimo}(c(\text{App}_{1i})) \text{ } i=1 \dots m$<br>$T_2 - \text{app}_{2k} \text{ tal que consumo}(\text{app}_{2k}) = \text{mínimo}(c(\text{App}_{2i})) \text{ } i=1 \dots m$<br>.....<br>$T_n - \text{app}_{nk} \text{ tal que consumo}(\text{app}_{nk}) = \text{mínimo}(c(\text{App}_{ni})) \text{ } i=1 \dots m$ |
| Definir niveles de interacción I y calcular el coeficiente $\alpha$ para las aplicaciones seleccionadas | $T_1: \text{app}_{1k} - I_1 \text{ y } \alpha_1 = \alpha_{11} + \alpha_2 \text{ donde } \alpha_{11} = 2^{(I_1-1)} - 1$<br>$T_2: \text{app}_{2k} - I_2 \text{ y } \alpha_2 = \alpha_{12} + \alpha_2 \text{ donde } \alpha_{12} = 2^{(I_2-1)} - 1$<br>.....<br>$T_n: \text{app}_{nk} - I_n \text{ y } \alpha_n = \alpha_{1n} + \alpha_2 \text{ donde } \alpha_{1n} = 2^{(I_n-1)} - 1$          |
| Medir la potencia y el tiempo utilizado por las aplicaciones para ejecutar cada tarea.                  | $T_1 - \text{app}_{1k} - p_1 \text{ y } t_1$<br>$T_2 - \text{app}_{2k} - p_2 \text{ y } t_2$<br>.....<br>$T_n - \text{app}_{nk} - p_n \text{ y } t_n$  |
| Calcular la energía requerida para cada tarea (Aplicando el modelo de consumo)                          | $T_1: e_1 = r_1 \times (p_1 + \alpha_1 p_1) \times (t_1 + \lambda t_1)$<br>$T_2: e_2 = r_2 \times (p_2 + \alpha_2 p_2) \times (t_2 + \lambda t_2)$<br>.....<br>$T_n: e_n = r_n \times (p_n + \alpha_n p_n) \times (t_n + \lambda t_n)$   |
| Determinar el total de energía requerido  | $e_{Total} = e_s + \sum_{j=1}^n e_j$   |

Estos valores se utilizan para determinar las horas del día en las que se pueden ejecutar las tareas. Horas i en el intervalo [9 a 18], tal que:

$$e_{Total} + m \leq e_i$$

$e_{Total}$  – energía requerida para ejecutar  $r_k$  veces las tareas  $T_k$  ( $k = 1..n$ )

$m$  – margen de error (15% de la energía requerida  $0,15 \times e_{Total}$ )

$e_i$  – energía disponible para la hora i (del modelo de energía disponible)

## 5.7 Aplicación de los modelos

En el Capítulo 7: se presenta un caso de estudio desarrollado en una comunidad educativa rural aislada. Se implementó un escenario que posibilitó a maestros y alumnos, el acceso a contenidos educativos digitales mediante el uso de dispositivos móviles con recarga basada en energía solar fotovoltaica. Los modelos desarrollados se utilizaron exitosamente para planificar los horarios de clase en función de los requerimientos energéticos de los celulares y de la energía disponible en la zona.

## Capítulo 6: Aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica

### 6.1 Resumen

Una buena parte de los paneles desarrollados por la industria están dimensionados para trabajar con baterías de 12 voltios o superiores (24V o 48V), esto para abarcar una serie de equipos que funcionan con ese rango de voltaje, entre otros: lámparas LED, bombas de agua y radios, o bien en conexiones a la red eléctrica. La potencia que entregan estos paneles está muy por encima de la que requiere un celular: 4 Watts (5Vx0,8A). Por lo que, utilizar este tipo de paneles para la recarga de dispositivos móviles implica un desperdicio de potencia y requiere de circuitos adicionales que regulen el voltaje de carga.

En este capítulo se realiza un estudio de la eficiencia en paneles fotovoltaicos, con diferentes configuraciones de celdas y conexionado (paralelo/serie), con la finalidad de optimizar la potencia entregada por el panel a los requerimientos energéticos de un dispositivo móvil. El mayor impacto positivo se consigue, conectando en paralelo tres filas de doce celdas en serie.

Además, se presenta un prototipo para medir la energía que entrega un panel solar en cada hora del día, los valores de estas mediciones son leídos desde un celular a través de una aplicación móvil. Utilizando los modelos desarrollados en el capítulo anterior y los valores medidos por el prototipo, la aplicación estima la energía por hora que un panel puede entregar y los requerimientos energéticos de las tareas a ejecutar. Utilizando estas estimaciones es posible planificar la ejecución de tareas en el dispositivo en función de la energía disponible.

### 6.2 Optimización de la potencia entregada por un panel fotovoltaico

En la Figura 6-1 se muestra una configuración típica utilizada por los fabricantes de paneles pequeños: 36 celdas en serie, cada celda con capacidad para generar 0,5V de tensión y 0,58A de corriente.

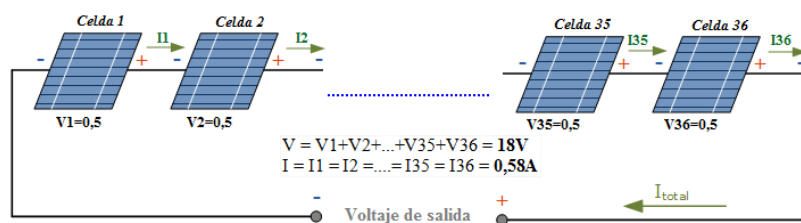


Figura 6-1: Configuración 1 x 36

En la Figura 6-2 se observa la curva IV de un panel genérico pequeño  $V_{oc}=21,9V$ ,  $I_{sc}=0,65A$ . Para aprovechar la capacidad de este panel, se espera que este trabaje con una corriente (I) y voltaje (V) que maximicen la potencia. En este caso, se consigue cuando el panel trabaja con una corriente de 0,58A y una tensión de 18V ( $P_{max}=10W$ ). Si se utiliza el panel para cargar un celular, que requiere solamente 5V, el panel trabajará muy por debajo de su capacidad y no se aprovechará la energía que entrega:

Potencia máxima  $18V \times 0,58A = 10,44W$

Potencia de carga  $5V \times 0,63A = 3,15 W$

$3,15W/10,44W = 0,30$  (solo 30% de aprovechamiento teórico)

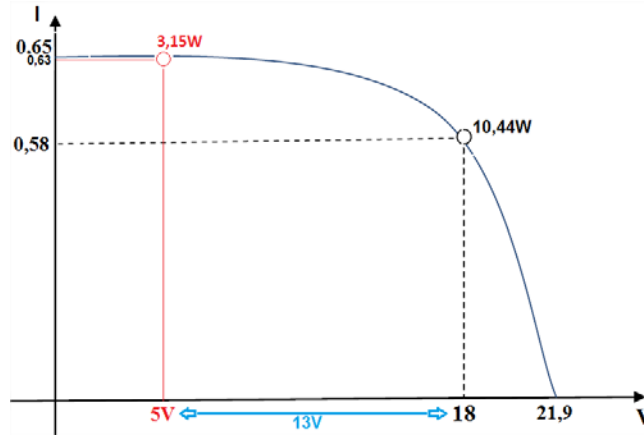


Figura 6-2: Curva IV para configuración 1x36

A continuación se presentan dos configuraciones, en las cuales se modifica el panel conectando las celdas de diferente manera para mejorar el aprovechamiento de la energía disponible. Ambas configuraciones, no sólo aprovechan mejor la energía, sino que entregan una mayor intensidad de corriente (amperaje), lo cual acelera el tiempo de carga de la batería del celular.

### 6.2.1 Configuración 1: 2 filas en paralelo y 18 celdas en serie por fila

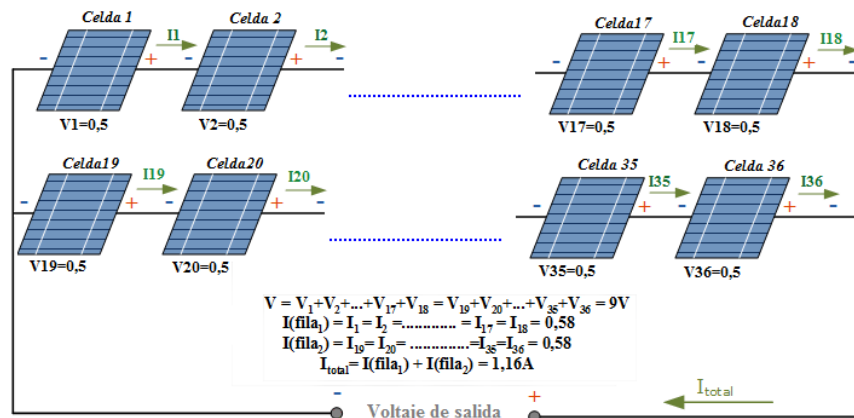


Figura 6-3: Configuración 2x18

$18 \times 0,5V = 9V$  y  $2 \times 0,58A = 1,16A$

Potencia máxima  $9V \times 1,16A = 10,44W$

Potencia de carga  $5V \times 1,28A = 6,4 W$

$6,4/10,44 = 0,61$  (61% del aprovechamiento teórico máximo)



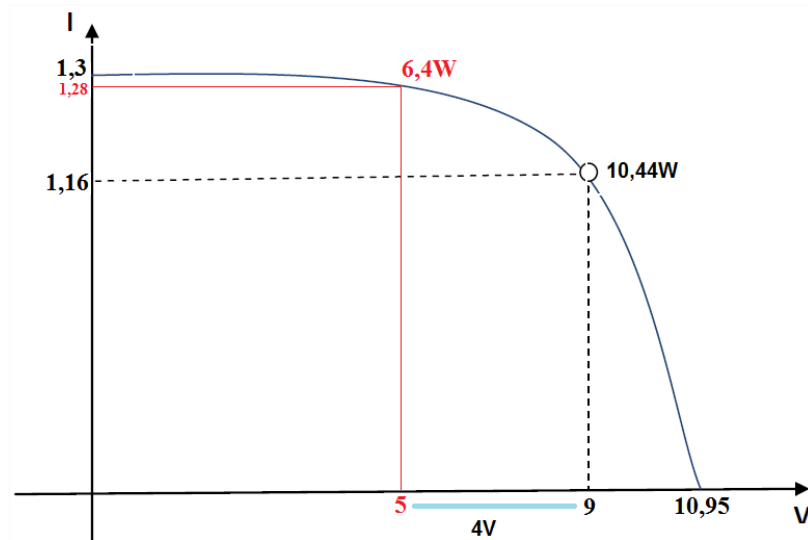


Figura 6-4: Curva IV para una configuración 2x18

### 6.2.2 Configuración 2: 3 filas en paralelo y 12 celdas en serie por fila.

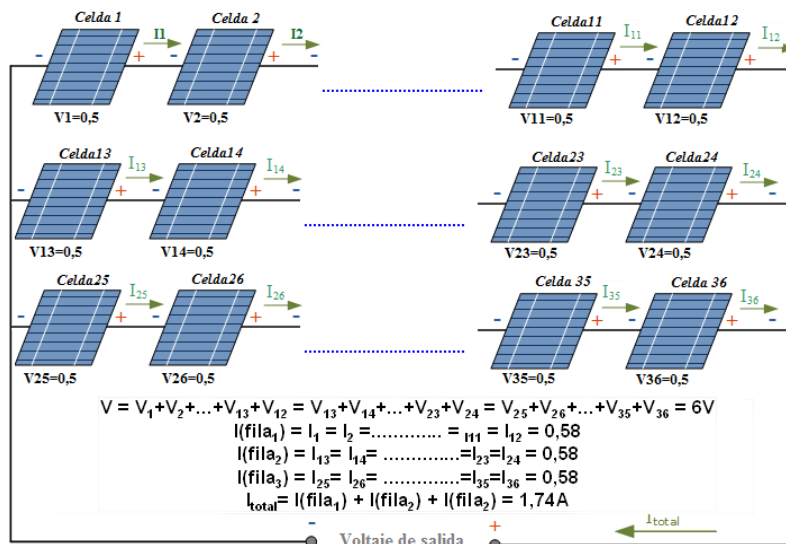


Figura 6-5: Configuración 3x12

$12 \times 0,5V = 6V$  y  $3 \times 0,58A = 1,74A$

Potencia máxima  $6V \times 1,74A = 10,44W$

Potencia de carga  $5V \times 1,90A = 9,5W$

$9,5W/10,44W = 0,91$  (91% de aprovechamiento teórico máximo)

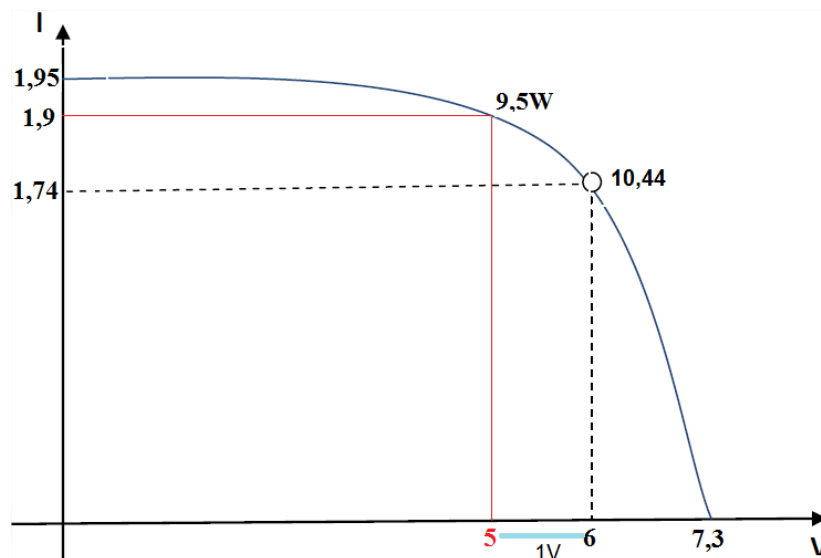


Figura 6-6: Curva IV para una configuración 3x12

La configuración 3x12 es la que mejor aprovechamiento entrega, se aprovecha el 91% de la energía para la carga del dispositivo y queda un 9% como margen para pérdidas, que pueden ser ocasionadas por diversos factores.

Para implementar esta configuración existen 3 posibilidades: 1) Encargar al fabricante, lo que puede tener un elevado costo 2) Comprar 3 paneles de 12 celdas en serie y conectarlos en paralelo y 3) Modificar un panel de 36 celdas en serie, abriendo el módulo en su cara posterior y conectando en paralelo conjuntos de 12 celdas, esta opción es compleja y requiere de experiencia y habilidad [4].

### 6.3 Prototipo para gestionar la energía disponible

Como parte del trabajo de esta tesis, se construyó un prototipo que implementa los modelos desarrollados en el capítulo anterior. El prototipo (Figura 6-7) se construyó utilizando un panel fotovoltaico de tamaño y peso reducido optimizado para dispositivos móviles (configuración 3x12), una placa de control Arduino, sensores de corriente y temperatura, reloj de tiempo real y módulo para memoria SD. En la placa Arduino se ejecuta un programa de control que periódicamente recolecta los valores de los sensores y los almacena en la memoria SD para ser enviados a una aplicación móvil cuando sean requeridos.

Para comunicar el dispositivo móvil con la placa de control se desarrolló la aplicación móvil GIRA Sol (Gestión Inteligente de Recarga Solar). Los datos almacenados en la memoria SD, son leídos por la aplicación a través del puerto USB de la placa de control y son utilizados por GIRA Sol para calcular la cantidad de energía por hora que el panel puede suministrar al dispositivo móvil.

Conociendo la energía disponible por hora y los requerimiento energéticos de las aplicaciones utilizadas para ejecutar tareas de uso frecuente en zona rural, GIRA Sol es capaz de determinar qué tareas se pueden ejecutar y en qué franja horaria.

Componentes del prototipo:

- Panel solar optimizado (entrega 5V y 1A)
- Placa de control (Arduino UNO)
- Módulo registrador de datos (Reloj de tiempo real, adaptador para memoria SD y tarjeta de memoria SD, sensores de corriente, tensión y temperatura)
- Adaptador USB OTG

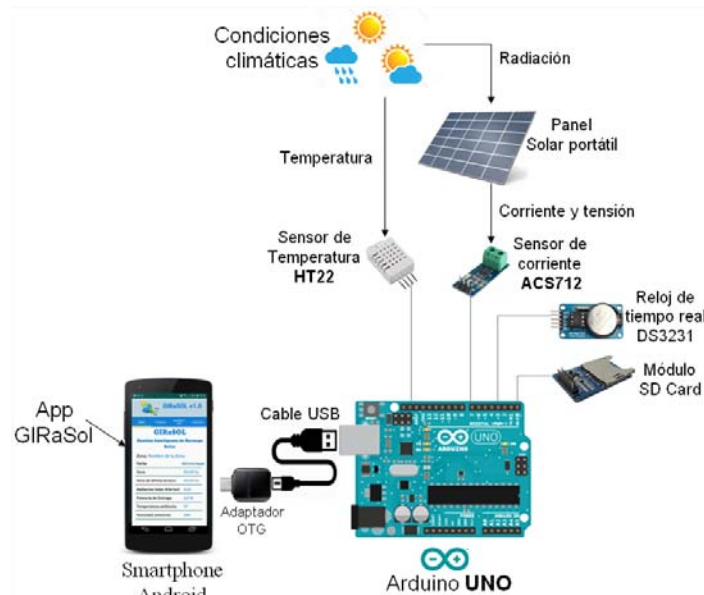


Figura 6-7: Prototipo para gestionar la energía disponible

### 6.3.1 Panel solar

Se utilizó un panel de tamaño y peso reducido, optimizado para entregar los requerimientos energéticos de un dispositivo móvil (5V y 1A), configuración 3 filas en paralelo y 12 celdas en serie por fila (Apartado 6.2.2).

### 6.3.2 Placa de control Arduino UNO R3

El Arduino Uno R3 [66] es una placa electrónica de control basada en el microcontrolador Atmega328 de Atmel. La placa (Figura 6-8) está equipada con conjuntos de pines de E/S digitales y analógicos que pueden conectarse a varias placas de expansión y otros circuitos o sensores. La placa tiene 14 pines digitales y 6 pines analógicos, programables con el Arduino IDE (Entorno de desarrollo integrado) a través de un cable USB tipo B.

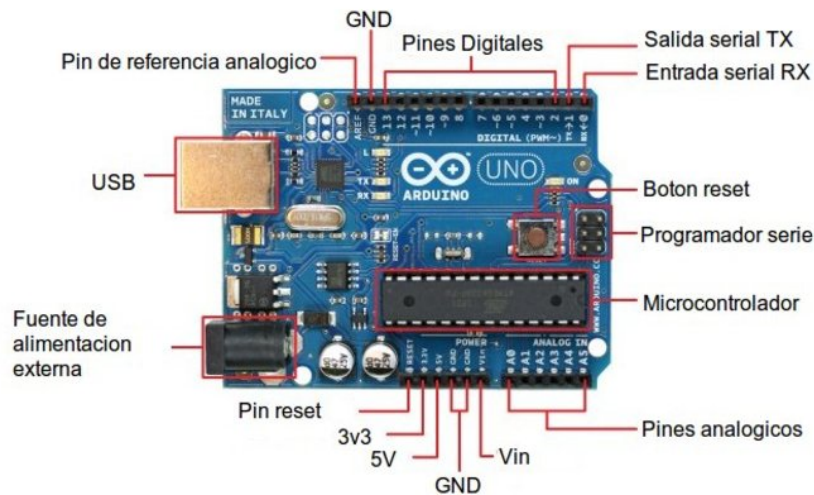


Figura 6-8: Arduino UNO R3  
Fuente: [66]

Especificaciones técnicas de la placa Arduino UNO R3:

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Microcontrolador           | ATmega328P (8 bits), 32 KB de memoria flash, 1 KB de memoria EEPROM, 2 KB de SRAM, 23 líneas de E/S de propósito general y 32 registros de proceso general. |
| Tensión de funcionamiento  | 5V  |
| Digital pines I/O          | 14 (de los cuales 6 proporcionan una salida PWM)  |
| PWM digital pines I/O      | 6   |
| Pines de entrada analógica | 6   |
| Corriente DC por Pin I/O   | 20mA  |
| Corriente DC para Pin 3.3V | 60mA  |
| Memoria flash              | 32KB ATmega328P de los que 0,5 KB son utilizados por el gestor de arranque.   |
| SRAM                       | 2KB ATmega328P  |
| EEPROM                     | 1KB ATmega328P  |
| Velocidad de reloj         | 16 MHz  |
| Longitud                   | 68,6 mm   |
| Anchura                    | 53,4 mm   |
| Peso                       | 25 g  |

### 6.3.3 Módulo registrador de datos

Un registrador de datos o *Data Logger* [67] es un sistema que permite registrar y guardar datos o información en un lapso de tiempo predeterminado. Esta información puede provenir de variables como potencia, corriente, tensión, temperatura, etc.

Los componentes principales de un registrador de datos son: el procesador, la memoria, el reloj de tiempo real y los sensores.

- El procesador es el encargado de recolectar los datos del sensor y guardarlos en la memoria. Según el tipo de procesador utilizado se puede guardar información a mayor velocidad y con mayor resolución. Además, dependiendo de su arquitectura, puede consumir una cantidad mayor o menor de energía.
- La memoria permite guardar la información a registrar. Si se tiene poca memoria y una velocidad de captura de datos muy alta, entonces sólo se podrá guardar información en un lapso muy corto. Un aspecto importante de este elemento es el tiempo que le toma al procesador guardar los datos. Este tiempo o latencia puede perjudicar a la sincronización de la información registrada.
- Reloj de Tiempo Real (RTC). es un dispositivo electrónico que permite obtener mediciones de tiempo en las unidades temporales que se emplean de forma cotidiana. Su objetivo principal es el de proporcionar a la medición una referencia absoluta o relativa del tiempo. En qué fecha, minuto, segundo, hora o año se tomó la medición.
- Sensores. Los sensores son el medio por el cual se puede medir una variable. Existen principalmente dos tipos de sensores, los activos y los pasivos. Los sensores activos requieren de una fuente de alimentación para poder funcionar.

El prototipo implementa un registrador de datos que almacena los datos entregados por los sensores en un archivo LOG con el siguiente formato:

(Mes, día, hora, corriente I, tensión V, temperatura T)

Para la construcción del registrador se utilizó el siguiente equipamiento:

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>Procesador</b>           | ATmega328P del Arduino UNO R3                  |
| <b>Memoria</b>              | Adaptador SD para Arduino y memoria SD de 16Gb |
| <b>Reloj de Tiempo Real</b> | RTC DS3231                                     |
| <b>Sensores</b>             | De corriente ACS712 y Temperatura HT22         |

### 6.3.3.1 Adaptador SD para Arduino

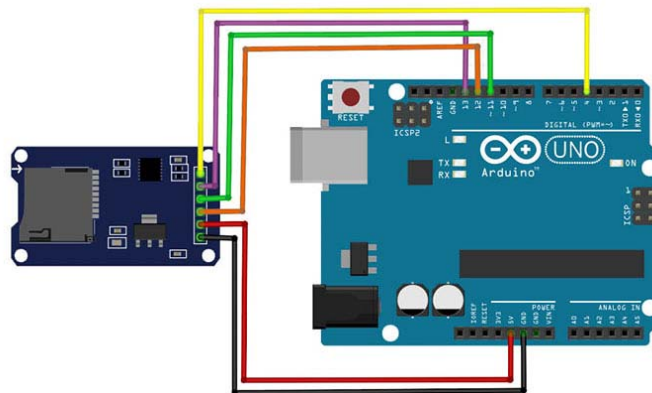


Figura 6-9: Conexión Arduino – Módulo SD

Fuente: [68]

Para almacenar los valores entregados por los sensores, se utilizó una memoria SD de 16Gb, conectada a la placa Arduino a través de un módulo SD [67]. El módulo permite crear un archivo en una tarjeta SD para escribir y guardar datos usando la librería SD Arduino, utilizando el protocolo de comunicación SPI. En la Figura 6-9 se representa gráficamente el conexionado entre la placa Arduino y el módulo SD.

### 6.3.3.2 Reloj de Tiempo Real RTC DS3231

El DS3231 [69] es un reloj en tiempo real de alta precisión que cuenta con un oscilador a cristal con compensación de temperatura (TCXO). Es ideal para aplicaciones en las que la precisión a largo plazo es muy importante, pudiendo éste conservar el tiempo por años gracias a su oscilador interno con compensación de temperatura. Libera a Arduino de tener que realizar la contabilización del tiempo e incorpora una mini batería que permite mantener el valor del tiempo en caso de pérdida de alimentación.

Además de reducir el consumo de energía, incorpora medición y compensación de la temperatura garantizando una precisión de al menos 2 ppm<sup>4</sup>, lo que equivale a un desfase máximo 172ms/día o un segundo cada 6 días.

La comunicación se realiza a través del bus I2C, por lo que es sencillo obtener los datos medidos. La tensión de alimentación es de 2.3 a 5.5V. En la Figura 6-10 se muestra el conexionado del circuito a la placa Arduino.

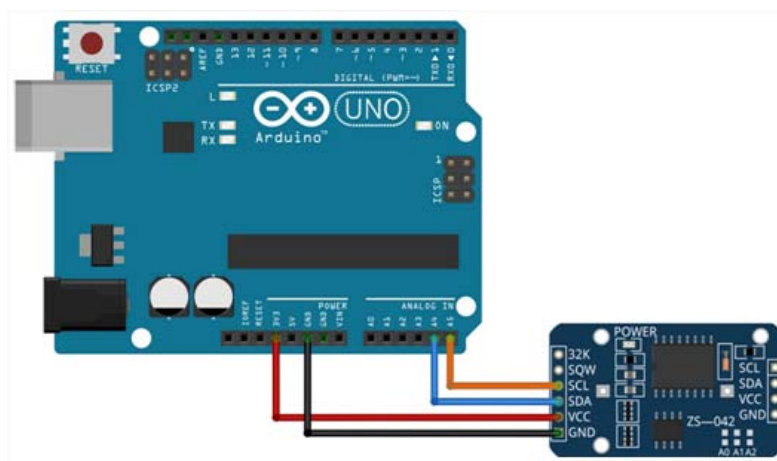


Figura 6-10: Conexionado Arduino – DS3231  
Fuente: [68]

### 6.3.3.3 Sensor de corriente

Para medir la corriente que fluye en un conductor se utilizó el circuito integrado que ACS712 [70]. Se trata de un pequeño sensor que mide la corriente utilizando el efecto Hall, y devuelve un valor de tensión entre 0V y 5V, proporcional a la intensidad que circula. Presenta las siguientes características técnicas:

- Mide corriente AC (alterna) y DC (continua)
- Tensión de alimentación (5V)
- Es bidireccional, puede medir desde -5A a + 5A (equivalente a 185mV/A)
- Salida del sensor entre 0 y 5 voltios
- Tiene una corriente de 0A cuando entrega una tensión de salida de VCC/2, es decir, 2,5V (Figura 6-11)

<sup>4</sup> ppm partes por millón

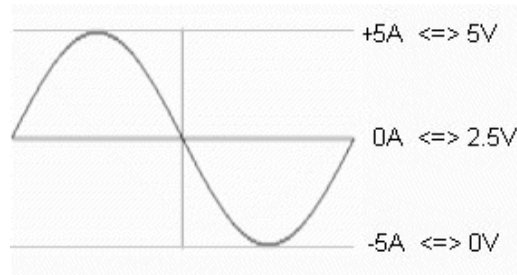


Figura 6-11: Variación de la tensión en función de la corriente en el circuito ACS712

La corriente que desea medirse, genera un campo magnético que el sensor convierte en un voltaje proporcional en su salida, utilizando el efecto Hall<sup>5</sup>. Este voltaje a su vez es leído por la placa de control a través de un convertidor A/D para obtener su valor pico y mediante operaciones aritméticas calcular la corriente de carga.

El sensor entrega un valor de 2.5 voltios para una corriente de 0A y a partir de allí incrementa proporcionalmente de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente. Dicha relación es una línea recta en una gráfica Voltaje (V) en función de la Corriente (I) donde la pendiente es la sensibilidad y la intersección en el eje Y es 2.5 voltios. La ecuación de la recta es la siguiente:

$$V = mI + 2,5$$

Donde V es la tensión I la corriente y la pendiente m y equivale a la Sensibilidad (0.185 para un sensor de 5A).

Despejando tendremos la ecuación para hallar la corriente a partir de la lectura del sensor:

$$I = \frac{V - 2,5}{\text{Sensibilidad}}$$

A continuación se presenta el código (Arduino) simplificado para la lectura del sensor ACS712:

```
Sensibilidad=0.185; //sensibilidad para sensor de 5A
VoltajeSensor = analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0); //lectura del sensor
Corriente = (VoltajeSensor-2.5)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
```

Observe que los incrementos de las lecturas están dados por el cociente 5.0/1023, esto se debe a que los puertos analógicos en Arduino utilizan un conversor A/D que va de 0 a 1023, donde el 0 == 0 V y el 1023 == 5 V

El modo de conexión se muestra simbólicamente en la Figura 6-12.

<sup>5</sup> Es la medición del voltaje transversal en un conductor cuando es puesto en un campo magnético.

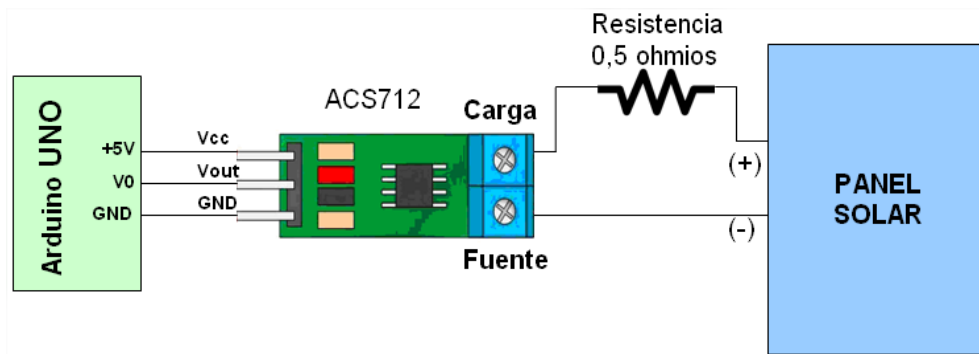


Figura 6-12: Conexionado del sensor ACS712

Fuente: [71]

### 6.3.3.4 Sensor de temperatura

El DHT22 [72] es un sensor digital de temperatura y humedad relativa de bajo costo. Integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no posee salida analógica). Este sensor trabaja con un rango de medición de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$  con precisión de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  y rango de humedad de 0 a 100% RH con precisión de 2% RH, el tiempo entre lecturas puede ser de 2 segundos.

En la Figura 6-13 se muestra el conexionado. El fabricante recomienda utilizar una resistencia de 4.7K Ohm entre el pin de Datos y VCC.

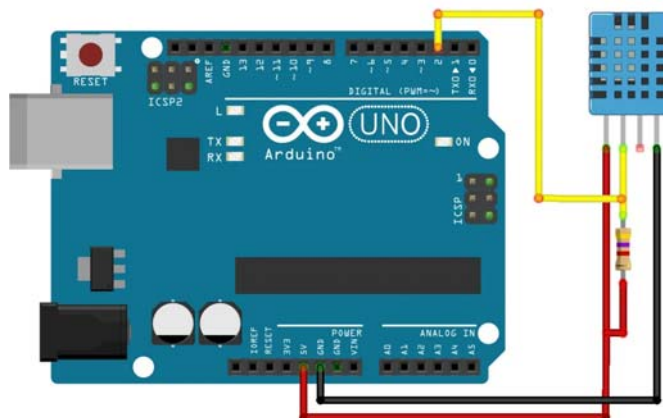


Figura 6-13: Conexionado Arduino - DHT22

Fuente: [72]

Código simplificado para la lectura de valores del sensor:

```
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 2 // Pin donde está conectado el sensor
#define DHTTYPE DHT22 // Sensor DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
void loop() {
  delay(2000);
  float h = dht.readHumidity(); //Lectura de la Humedad
  float t = dht.readTemperature(); //Lectura de la temperatura en grados Celsius
}
```



### 6.3.3.5 Código simplificado para el registrador

A continuación se presenta el código integrado para la lectura del sensor de corriente ACS712, sensor de temperatura DHT22, reloj de tiempo real DS3231, y el almacenamiento de los valores en un archivo LOG en memoria SD cada 30 segundos.

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 2 // Pin donde está conectado el sensor
#define DHTTYPE DHT22 // Sensor DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
File logFile;
RTC_DS3231 rtc;
float Sensibilidad=0.185; //sensibilidad para sensor de 5A
float voltajeSensor;
float corriente=0;
void logValue(DateTime date, float tension, float corriente)
{
    logFile.print(date.year(), DEC);
    logFile.print("/");
    logFile.print(date.month(), DEC);
    logFile.print("/");
    logFile.print(date.day(), DEC);
    logFile.print(" ");
    logFile.print(date.hour(), DEC);
    logFile.print(":");
    logFile.print(date.minute(), DEC);
    logFile.print(":");
    logFile.print(date.second(), DEC);
    logFile.print(",");
    logFile.print(tension);
    logFile.print(",");
    logFile.println(corriente);
}
void loop()
{
    bool val = SD.begin(pin_lector); //Inicializamos la tarjeta SD
    if (val)
    {
        logFile= SD.open("log.txt", FILE_WRITE); //Abrimos el fichero
        if (logFile)
        {
            DateTime now = rtc.now(); //lectura de hora y fecha del DS3231
            float h = dht.readHumidity(); //Lectura de la Humedad
            float t = dht.readTemperature(); //Lectura de la temperatura en grados Celsius
            VoltajeSensor= analogRead(A0)*(5.0 / 1023.0); //lectura del sensor
            Corriente = (VoltajeSensor-2.5)/Sensibilidad; //Ecuación para obtener la corriente
            logvalue(now, VoltajeSensor, Corriente,h,t) // datos al log
            logfile.close();
        }
    }
    delay(30000); // 30 segundos de pausa para la siguiente muestra
}
```

### 6.3.4 Adaptador USB OTG

Los datos almacenados en memoria son enviados a un dispositivo móvil con soporte USB OTG(*On The Go*) [73] utilizando el puerto USB de la placa Arduino. OTG o USB OTG, es una extensión de USB 2.0 que permite a un dispositivo móvil actuar como host y conectar al mismo diferentes dispositivos USB. La mayoría de los celulares incorporan un conector micro USB, es por ello que para conectar un celular a una placa Arduino (puerto USB) se requiere un adaptador OTG A-B que nos permite conectar el puerto A (micro USB macho) con el puerto B (USB hembra). En la Figura 6-14 se ilustra la conexión.

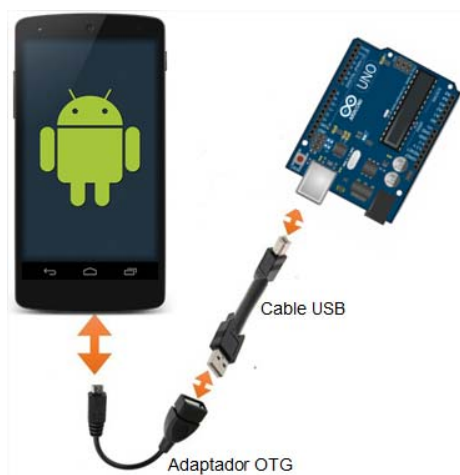


Figura 6-14: Conexión OTG entre un dispositivo móvil y una placa Arduino

### 6.3.5 Aplicación móvil para la Gestión Inteligente de Recarga Solar

Para comunicar un celular con el prototipo se desarrolló la aplicación móvil GIRaSol (Gestión Inteligente de Recarga SOLar). Esta aplicación implementa los modelos desarrollados en el capítulo anterior para estimar la energía por hora que un panel es capaz de entregar y los requerimientos energéticos de las tareas a ejecutar. GIRaSol permite establecer la comunicación con el cargador, leer los datos del registrador y gestionar las tareas a ejecutar en función de la energía disponible.

En la Figura 6-15 se representan gráficamente las interacciones y la salida de la aplicación, y a continuación se describe su funcionamiento:

- Utiliza el modelo de energía requerida (Apartado 5.3) para estimar los requerimientos energéticos de las tareas a ejecutar.
- Se comunica con el puerto USB de la placa Arduino a través de un adaptador USB OTG.
- Lee los datos del archivo Log, almacenados en el siguiente formato (fecha, hora, corriente I, tensión V, temperatura T).
- Aplica el modelo de energía disponible (Apartado 5.4) para estimar la energía que el panel puede entregar en la zona, utilizando los datos del archivo Log para determinar los factores de proporción por hora ( $\phi_i$ ).
- Con base en las estimaciones, muestra en pantalla los horarios en los que se pueden ejecutar las tareas seleccionadas (Figura 6-16)



Figura 6-15: GIRA SOL - Gestión Inteligente de Recarga Solar

| GIRA SOL v1.0      |                   |                    |            |
|--------------------|-------------------|--------------------|------------|
| INFO               | TAREAS            | PARAMET-ROS        | ENERGÍA    |
| Energía Disponible |                   |                    |            |
| Franja Ho-         | Energía Requerida | Energía Disponible | Rema-nente |
| 9 a 10             | 7.2 wh            | 3 wh               | - 4.2wh    |
| 10 a 11            | 7.2 wh            | 5 wh               | - 2.2wh    |
| 11 a 12            | 7.2 wh            | 7 wh               | - 0.2wh    |
| 12 a 13            | 7.2 wh            | 9 wh               | 1.8 wh     |
| 13 a 14            | 7.2 wh            | 10 wh              | 2.8 wh     |
| 14 a 15            | 7.2 wh            | 9 wh               | 1.8 wh     |
| 15 a 16            | 7.2 wh            | 8 wh               | 0.8 wh     |
| 16 a 17            | 7.2 wh            | 6 wh               | - 1.2wh    |
| 17 a 18            | 7.2 wh            | 3 wh               | - 4.2wh    |

Figura 6-16: GIRA SOL - Salida

Se requiere carga previa de los siguientes datos:

- Horas solar pico de la zona (HSP).
- Potencia máxima que entrega el panel ( $p_{max}$ ).
- Parámetros fijos ( $C$ ,  $B$ ,  $G$ ,  $e_0$ ).
- Para cada tarea: Potencia ( $p_i$ ), tiempo ( $t_i$ ) y nivel de interacción de la aplicación ( $I$ ) de la aplicación seleccionada para realizar la tarea. Los valores de  $p_i$  y  $t_i$  se determinan utilizando la metodología de medición desarrollada en el apartado 4.2.

Para ilustrar la carga de datos, a continuación se presentan capturas de la aplicación GIRaSol. La aplicación tiene precargadas las tareas de uso frecuente en zonas rurales aisladas con sus respectivos parámetros, el usuario puede seleccionar desde un menú desplegable aquellas que necesite utilizar.



Figura 6-17: GIRaSol - Selección de tareas



Figura 6-18: GIRaSol - Carga de parámetros

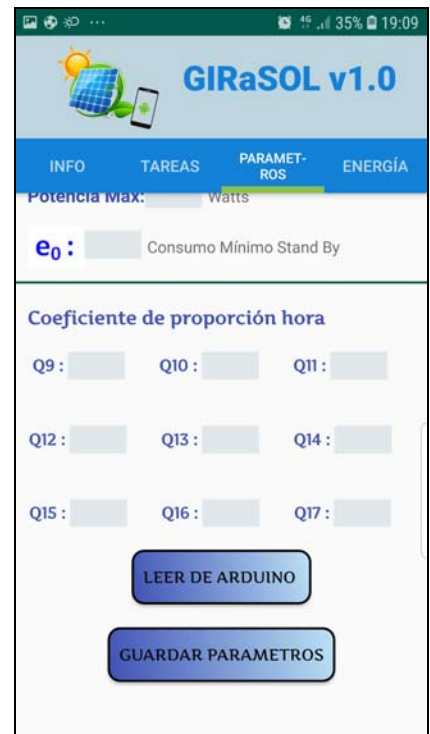


Figura 6-19: GIRaSol - cálculo de coeficientes de proporción

## **Capítulo 7: Caso de estudio.**

### **7.1 Resumen**

Argentina posee numerosas zonas rurales aisladas, donde las condiciones de vulnerabilidad social y económica, la baja densidad poblacional y el aislamiento geográfico (grandes distancias entre las viviendas y las escuelas o los centros urbanos), motivaron la creación de albergues dentro de las escuelas como una forma de garantizar que los chicos asistan cotidianamente a clases. En algunos casos, los alumnos viven en los albergues durante toda la semana (de lunes a viernes) y en otros, permanecen durante todo el ciclo lectivo o en períodos específicos.

Las escuelas albergue disponen de un plantel docente muy reducido, generalmente un director de establecimiento y un maestro que imparte educación en los diferentes grados. Cuentan con la asistencia de un profesor itinerante que recorre un itinerario de escuelas con el fin de orientar y apoyar al maestro en el desarrollo de sus tareas educativas, detectando y desarrollando las capacidades reales que cada niño posee. En algunas escuelas el profesor itinerante proporciona servicios directamente al alumno, coordinando la instrucción con el maestro.

En estos establecimientos educativos el aprendizaje mediado por tecnologías es prácticamente inexistente debido a las limitaciones energéticas de la zona y al elevado consumo de los equipos computacionales [74]. Sin embargo, los dispositivos móviles (Celulares y Tabletas) constituyen una alternativa viable para este tipo de escuelas, por su bajo consumo energético respecto de computadoras convencionales [2], haciendo posible que los alumnos se nutran de nuevas estrategias de aprendizaje que contribuyen a reducir la brecha digital existente entre los alumnos de los centros urbanos y rurales [75].

En este capítulo se aplica la investigación realizada en esta tesis, para realizar una experiencia educativa mediada por TIC en una escuela aislada, utilizando dispositivos móviles de bajo consumo energético y energía solar fotovoltaica para la recarga de las baterías. Un maestro de la escuela desarrolló una clase de Geografía con la colaboración de alumnos de la Universidad Nacional de Salta, quienes brindaron soporte técnico para el uso del equipamiento utilizado.

Los resultados alcanzados fueron positivos y altamente significativos desde el punto de vista educativo y social, haciendo posible que los alumnos se nutran de nuevas estrategias de aprendizaje que contribuyen a reducir la brecha digital existente entre los alumnos de los centros urbanos y rurales.

### **7.2 Contexto**

La experiencia se realizó el mes de octubre de 2019 en el Paraje El Rosal, Departamento de Rosario de Lerma, Provincia de Salta, más precisamente en la Escuela Albergue “4546”. Dicho lugar se encuentra a 150 kilómetros de distancia de la ciudad de Salta (localidad capital de la provincia), a 3400 msnm, muy cerca de la Cordillera de los Andes. En la

Figura 7-1 se muestra una imagen del establecimiento y se lo ubica geográficamente, indicando el mismo con un círculo rojo.

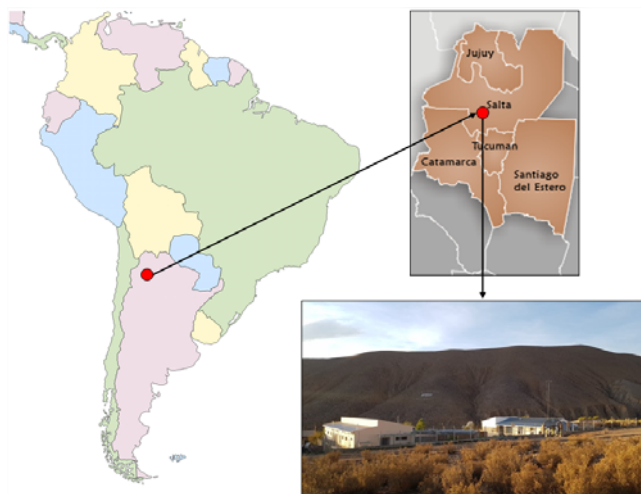


Figura 7-1: Ubicación geográfica del establecimiento educativo “4526”

Este establecimiento educativo se encuentra en una zona rural aislada, de difícil acceso y fuera del alcance de los centros de distribución de energía (Figura 7-2). Se accede a la escuela por un camino de 35 Km de ripio, en vehículo 4x4.



Figura 7-2: Paraje El Rosal

La aridez del clima, baja nubosidad y la latitud de la zona, hacen que se cuente con una alta radiación solar la mayoría de los días del año, la cual es aprovechada por los niños y maestros mediante el uso del siguiente equipamiento: cocinas solares que utilizan para cocinar los alimentos, calefones solares que sirven para calentar el agua utilizada para la higiene personal y sistemas fotovoltaicos que permiten satisfacer sus necesidades energéticas elementales.



Figura 7-3: Cocinas Solares en el Rosal



Figura 7-4: Calefón solar en el Rosal



## 7.3 Descripción

Se desarrolló una clase de Geografía de aproximadamente 2 horas de duración con la participación de un maestro y 9 alumnos de ambos sexos de tercera sección (sexto y séptimo grado), cuyas edades varían entre 10 y 13 años. Durante la explicación del profesor no estaba permitido el uso de celulares, al finalizar el maestro entregó un celular y un cuestionario de opción múltiple a cada alumno. Bajo la supervisión del profesor, los alumnos respondieron a las preguntas del cuestionario, utilizando los celulares para acceder a contenidos educativos alojados en Internet



Figura 7-5: Comunidad educativa de El Rosal



Figura 7-6: Participantes de la experiencia educativa

El montaje de la experiencia estuvo a cargo del tesista y 3 alumnos de la Universidad Nacional de Salta, en colaboración con el director y una maestra de la escuela. Se utilizó el siguiente equipamiento:

- 1 celular con chipset Qualcomm Snapdragon 410 (Gateway). No se ejecutaron tareas en este dispositivo.
- 9 celulares con chipset Qualcomm Snapdragon 410 (Clientes, uno por alumno).
- Prototipo de cargador solar (presentado en el capítulo 5). Utilizado para calcular los factores de proporción de energía por hora y para alimentar el celular utilizado como Gateway.
- 9 paneles fotovoltaicos portátiles para suministrar energía a los dispositivos (configuración 3x12,  $P_{\max}=10W$ ). Un panel para cada dispositivo cliente.

## 7.4 Implementación

La implementación se dividió en 6 etapas que se resumen a continuación:

### 7.4.1 Preparación

La escuela fue seleccionada aplicando los criterios especificados en el apartado 3.1.1.

Se realizó un contacto inicial con el director del establecimiento, el profesor Aldo Palacios, quien es reconocido a nivel nacional por su labor y su predisposición para innovar en su escuela<sup>6</sup>. Se le explicó al Director la propuesta y se gestionó la autorización para realizar una experiencia educativa mediada por TIC en la escuela.

---

<sup>6</sup> Nota en el diario La nación - <https://www.lanacion.com.ar/comunidad/el-director-transformo-escuela-rural-mas-3000-nid2168440>

Una vez obtenida la autorización, se realizaron 2 visitas preliminares a la escuela.

En la primera visita, se efectuó un relevamiento general de equipamiento disponible, aulas, radiación solar en la zona, etc. También se realizó un primer contacto con los niños albergados, efectuando actividades recreativas y explicándoles en términos simples las ventajas del uso de la energía solar para la recarga de sus celulares. Los niños ejecutaron aplicaciones educativas en sus celulares y recargaron las baterías de sus dispositivos utilizando paneles fotovoltaicos portátiles, que manipularon individualmente para mejorar el ángulo de incidencia del sol.

En la segunda visita, se ejecutaron tareas de coordinación con los maestros. Se definieron: tema a desarrollar en la experiencia educativa, formato de los cuestionarios y contenidos digitales necesarios para responder los cuestionarios.

En el transcurso de ambas visitas, los maestros de la escuela fueron capacitados en los siguientes temas: Principios básicos de energía solar fotovoltaica, sistemas fotovoltaicos portátiles, uso de la aplicación GIRA Sol, consumo energético de aplicaciones móviles, conexión de un dispositivo móvil a Internet.

#### 7.4.2 Instalación del prototipo.

Para relevar los datos de tensión (V), corriente (I) y temperatura de la zona, un día antes de realizar la experiencia se instaló el prototipo, acomodando el panel en plano horizontal. El día estuvo fresco y soleado y la temperatura máxima observada fue de 19°C.

El archivo LOG con los datos relevados por los sensores fue leído y procesado por GIRA Sol para calcular los factores de proporción. En la Tabla 7-1 se indica para cada hora del día el promedio de las siguientes magnitudes: corriente, tensión, tensión regulada, potencia entregada y potencia regulada.

| Franja Horaria                 | 8-9  | 9-10 | 10-11 | 11-12 | 12-13 | 13-14 | 14-15 | 15-16 | 16-17 | 17-18 | 18-19 |
|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Corriente I                    | 0,45 | 0,70 | 1,05  | 1,68  | 1,71  | 1,73  | 1,72  | 1,69  | 1,07  | 0,72  | 0,47  |
| Tensión V                      | 3,40 | 4,01 | 4,78  | 5,79  | 5,83  | 5,90  | 5,85  | 5,80  | 4,79  | 3,98  | 3,41  |
| Tensión V regulada             | 3,40 | 3,70 | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,70  | 3,41  |
| Potencia promedio PP           | 1,53 | 2,81 | 5,02  | 9,73  | 9,97  | 10,21 | 10,06 | 9,80  | 5,13  | 2,87  | 1,60  |
| Potencia promedio regulada PPR | 1,53 | 2,59 | 3,89  | 6,22  | 6,33  | 6,40  | 6,36  | 6,25  | 3,96  | 2,66  | 1,60  |

Tabla 7-1: Datos almacenados en el archivo LOG

Sumando los valores de la energía por hora, se obtuvo el total de energía entregada por el panel en un día:

$$1,53+2,81+5,02+9,73+9,97+10,21+10,06+9,80+5,13+2,87+1,60 = \mathbf{68,72 \text{ W/día.}}$$



Se calcularon los factores de proporción:

| Horario | Factores de proporción  |
|---------|---|
| 8-9     | $\phi_8 = \text{ppr}_8 / \text{pd} = 1,53 / 68,72 = 0,0223$       |
| 9-10    | $\phi_9 = \text{ppr}_9 / \text{pd} = 2,59 / 68,72 = 0,0377$       |
| 10-11   | $\phi_{10} = \text{ppr}_{10} / \text{pd} = 3,89 / 68,72 = 0,0565$ |
| 11-12   | $\phi_{11} = \text{ppr}_{11} / \text{pd} = 6,22 / 68,72 = 0,0905$ |
| 12-13   | $\phi_{12} = \text{ppr}_{12} / \text{pd} = 6,33 / 68,72 = 0,0921$ |
| 13-14   | $\phi_{13} = \text{ppr}_{13} / \text{pd} = 6,4 / 68,72 = 0,0932$  |
| 14-15   | $\phi_{14} = \text{ppr}_{14} / \text{pd} = 6,36 / 68,72 = 0,0926$ |
| 15-16   | $\phi_{15} = \text{ppr}_{15} / \text{pd} = 6,25 / 68,72 = 0,0910$ |
| 16-17   | $\phi_{16} = \text{ppr}_{16} / \text{pd} = 3,96 / 68,72 = 0,0576$ |
| 17-18   | $\phi_{17} = \text{ppr}_{17} / \text{pd} = 2,66 / 68,72 = 0,0388$ |
| 18-19   | $\phi_{18} = \text{ppr}_{18} / \text{pd} = 1,60 / 68,72 = 0,0233$ |

Luego se determinó la energía por hora aplicando los factores de proporción en la expresión  $\text{HSP} \cdot P_{\max} \cdot \phi_i$

| Franja Horaria       | 8-9    | 9-10   | 10-11  | 11-12  | 12-13  | 13-14  | 14-15  | 15-16  | 16-17  | 17-18  | 18-19  |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Factor de proporción | 0,0223 | 0,0377 | 0,0565 | 0,0905 | 0,0921 | 0,0932 | 0,0926 | 0,0910 | 0,0576 | 0,0388 | 0,0233 |
| Energía por hora     | 1,54   | 2,60   | 3,90   | 6,24   | 6,35   | 6,43   | 6,39   | 6,28   | 3,98   | 2,67   | 1,61   |

Tabla 7-2: Factores de proporción y energía por hora

Con base en los datos presentados en la Tabla 7-2, en la Figura 7-7 se ilustra la distribución de la energía por hora en la localidad de El Rosal para el mes de Octubre.

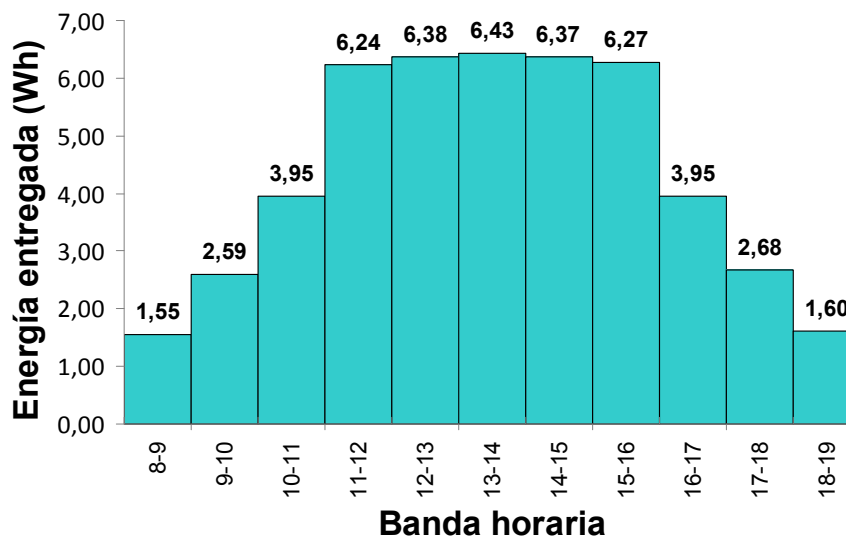


Figura 7-7: Energía entregada por hora

### 7.4.3 Configuración de GIRaSol.

Se procedió a:

- Cargar en GIRaSol los datos necesarios (parámetros) para calcular la **energía disponible** (HSP, Pmax), conectar el dispositivo al prototipo, leer los datos y calcular los coeficientes de proporción del LOG desde GIRaSol.

- Cargar en GIRaSol los datos necesarios para estimar la **energía requerida**:
  - Potencia que consume el dispositivo en modo *standby* ( $p_s$ ).
  - Tiempo en modo *standby* ( $t_s$ )
  - Lista de tareas a realizar y para cada tarea de la lista: Aplicación a utilizar, número de repeticiones, consumo y tiempo de referencia ( $p_0$  y  $t_0$ ) y nivel de interacción de la aplicación (I).
  - Parámetros del dispositivo. Nivel de brillo (N) y Gama del dispositivo (G).
  - Parámetros del usuario. Capacidad de uso del usuario (C).

En la Figura 7-8 se presentan capturas de las pantallas de carga de parámetros en GIRaSol.

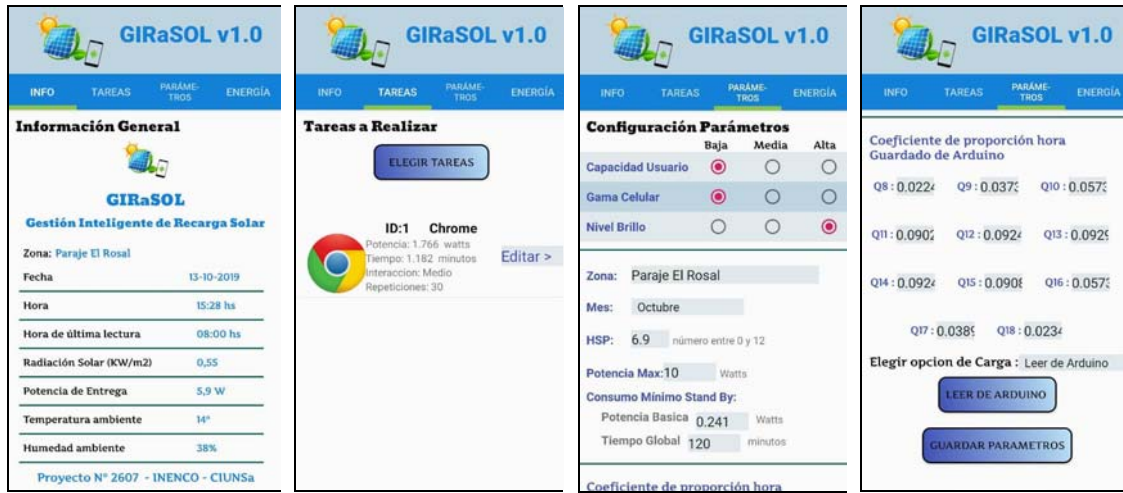


Figura 7-8: GIRaSol – Carga de parámetros

#### 7.4.3.1 Energía disponible

La energía disponible se calculó en base a datos del mapa solar de SISOL[48]. En la Figura 7-9 se observa que la radiación para un mes de Octubre en el paraje El Rosal es de 6,9 kWh/m<sup>2</sup>, por lo que la cantidad de Horas Solar Pico (HSP) será igual a 6,9.

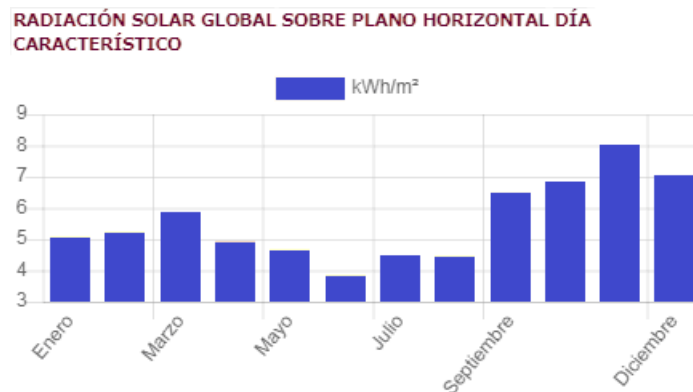


Figura 7-9: Radiación solar en el Rosal [48]

Se utilizaron paneles solares Jiawei modelo 10P modificados para optimizar el uso de la tensión y corriente que entregan: configuración 3x12. En la Figura 7-10 se muestran la ficha técnica de ese modelo. Se observa que la potencia máxima que entrega el panel es de

10W. Por lo tanto, la energía que entrega el panel en el paraje El Rosal un día de noviembre será: Energía = HSP x  $p_{\max}$  = 6,9x10W = 69W

| <b>JW-10P</b><br><b>Electrical Parameters</b> |   |
|---|---|
| Max Power (Pm)                                | 10W                                       |
| Voltage at Max Power (Vmp)                    | 17.4V                                     |
| Current at Max Power (Imp)                    | 0.58A                                     |
| Open Circuit Voltage (Voc)                    | 21.9V                                     |
| Short Circuit Current (Isc)                   | 0.65A                                     |
| Module Efficiency                             | 9.10%                                     |
| Max Power Tolerance                           | -5% / +10%                                |
| Nominal Operating CellTemp.                   | 46°C ±2                                   |
| Max System Voltage                            | 300V                                      |
| <b>Mechanical Parameters</b>                  |   |
| Cells Type & No.                              | 36 Multi                                  |
| Frame   | >15µm clear anodized                      |
| Junction Box                                  | AM- 1107-1                                |
| Connector                                     | AM4101                                    |
| Cabel   | 4mm², 500mm                               |
| Dimensions                                    | 400 x 274 x 35<br>(15.75 x 10.79 x 1.38m) |
| Weight  | 1.2kg (15.8lbs)                           |

Figura 7-10: Ficha técnica del panel Jiawei 10P

Se verificó que la energía entregada en el día por el (69W), sea cercano al obtenido utilizando los datos del mapa solar (68,72).

#### 7.4.3.2 Energía requerida

**Consumo en modo *standby*.** Utilizando Trepn Profiler, se determinó la energía que el dispositivo consume sin ejecutar aplicaciones. En la Figura 7-11 se presentan capturas de pantallas de la medición realizada, en las mismas se observa que la potencia promedio es de 240,59 mW. Los picos de consumo se deben al uso de la pantalla del celular al arrancar, durante y al finalizar la medición.

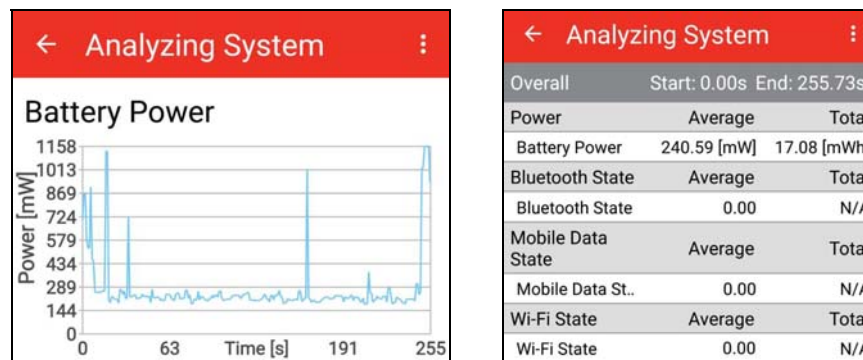


Figura 7-11: Consumo en modo standby

**Gama.** Todos los dispositivos utilizados en la experiencia pertenecían a la categoría gama baja ( $G=1$ ).

**Brillo.** Debido a las condiciones de iluminación, se utilizó un nivel brillo alto en todos los dispositivos ( $B=3$ ).

### Tarea a realizar en los dispositivos móviles

Acceso a contenidos educativos en la WEB

Cantidad de veces a repetir la tarea: 20

Tiempo asignado a la actividad educativa: 120 minutos

Durante el desarrollo del modelo de energía requerida (Apartado 5.3) se verificó que la aplicación que menor consumo presenta para acceder a contenidos en la WEB es el navegador Mint.

El cuestionario a desarrollar en la clase requiere del uso de teclado virtual para escribir la información de la búsquedas, por lo que se definió un nivel de interacción medio ( $I=2$ ).

Con la finalidad de determinar la capacidad de manejo de los usuarios se realizó la siguiente prueba: Búsqueda en Internet de un tema de Geografía, nombre y altura de la montaña más alta de la Argentina.

En primer lugar, y para establecer los valores de referencia, la prueba fue ejecutada por un usuario con capacidad de manejo alta ( $C=0$ ) en un dispositivo de Gama baja ( $G=0$ ) y utilizando un nivel de brillo bajo ( $B=0$ ). Se utilizó la aplicación Trepn Profiler para medir el tiempo y la potencia durante la prueba (Figura 7-12), obteniendo los siguientes resultados:

- Tiempo de referencia para realizar la tarea:  $t_1=71s$
- Potencia promedio de referencia para la tarea:  $p_1=2006,37 \text{ mW}$ . A este valor se le resto el consumo en modo standby:  $p_1=2006,37 \text{ mW} - 240,59 \text{ mW} = 1765,78$

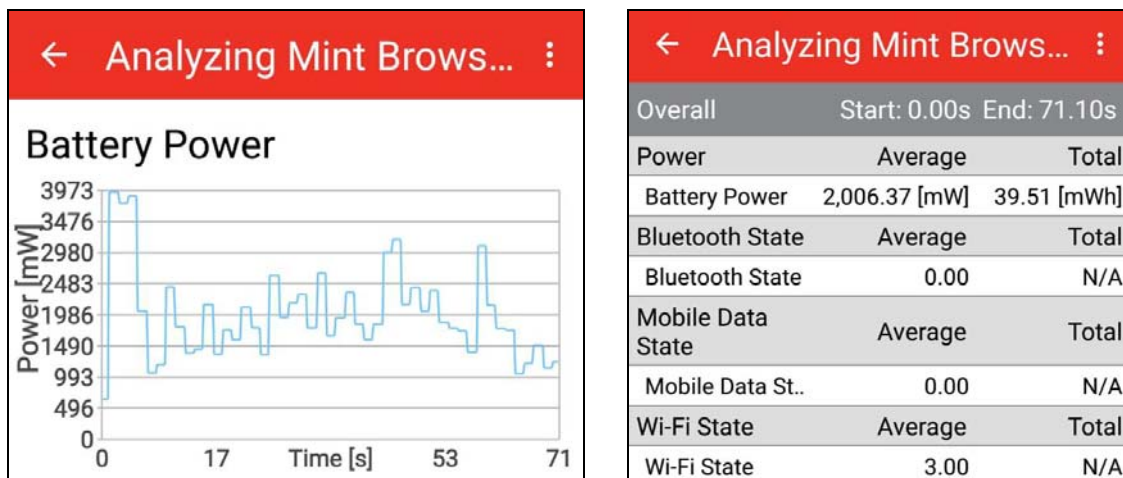


Figura 7-12: Caracterización del consumo para Mint con Trepn Profiler

A continuación la misma prueba fue realizada por cada uno de los alumnos, con el propósito de establecer su nivel de manejo.



Figura 7-13: Alumna ejecutando las pruebas para parametrizar GIRaSol.

- En la Tabla 7-3 se indica el tiempo que le tomó a cada alumno realizar la tarea y un factor que señala cuántas veces más de tiempo ocupó respecto al tiempo de referencia.

| Usuario | Tiempo | Factor | Capacidad |
|---------|--------|--------|-----------|
| 1       | 179    | 1,53   | baja      |
| 2       | 189    | 1,67   | baja      |
| 3       | 198    | 1,80   | baja      |
| 4       | 189    | 1,67   | baja      |
| 5       | 194    | 1,73   | baja      |
| 6       | 132    | 0,87   | Media     |
| 7       | 175    | 1,47   | baja      |
| 8       | 194    | 1,73   | baja      |
| 9       | 142    | 1,00   | Media     |

Tabla 7-3: Capacidad de manejo por usuario

Para facilitar la lectura de la tabla, se presentan dos ejemplos: El usuario 1 introduce 1,53 veces más de tiempo respecto a  $t_0$  y el usuario 9 introduce 1,01 veces más de tiempo respecto a  $t_0$ .

Según el modelo de energía requerida, un usuario de capacidad media demora aproximadamente 0,8 veces más de tiempo y un usuario de capacidad baja introduce aproximadamente 1,6 veces más de tiempo. En los ejemplos (usuarios 1 y 9):

- El factor del usuario 1 es 1,53 y está cercano a 1,6, por lo que se le asigna capacidad baja.
- El factor del usuario 9 es 1,01 y está cercano a 0,8, por lo que se le asigna capacidad media.

Usando este criterio se detectaron 7 usuarios de capacidad baja y 2 de media.

Para simplificar el uso de GIRaSol se decidió fijar el parámetro Capacidad como baja ( $C=3$ ), para todos los usuarios. Los dispositivos de los usuarios de capacidad media ( $C=2$ ) no fueron afectados con esta simplificación, ya que al ejecutar la tarea en menos tiempo se

utilizó una cantidad menor de energía y se acumuló el remanente en la batería del dispositivo.

En la Tabla 7-4 se resumen los valores de los parámetros utilizados para desarrollar la experiencia.

|                          |  |
|--------------------------|--|
| Tarea                    | Acceso a contenidos educativos en la WEB |
| Aplicación               | Mint Browser                             |
| Cantidad de Repeticiones | 30 ( $r=20$ )                            |
| Nivel de Interacción     | Medio ( $I=2$ )                          |
| Capacidad de manejo      | Baja ( $C=3$ )                           |
| Gama del dispositivo     | Baja ( $G=1$ )                           |
| Nivel de brillo          | Alto ( $B=3$ )                           |
| Potencia de referencia   | $p_1=1765,7 \text{ mW}=1,76\text{W}$     |
| Tiempo de referencia     | $t_1=71\text{s}=0,020 \text{ horas}$     |
| Potencia en standby      | $p_s=240,5 \text{ mW}=0,24\text{W}$      |
| Tiempo en standby        | $t_s=120 \text{ minutos}$                |

Tabla 7-4: Tabla de parámetros

Se aplicó el modelo para calcular la energía requerida:

|  |             |    |
|--|-------------|----|
| $\lambda_1$                              | 0,0         |    |
| $\lambda_2$                              | 0,4         |    |
| $\lambda=\lambda_1+\lambda_2$            | 0,4         |    |
| $\alpha_1$                               | 1,0         |    |
| $\alpha_2$                               | 1,6         |    |
| $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$           | 2,6         |    |
| $t_1+\alpha t_1$                         | 0,07        | h  |
| $p_1+\lambda p_1$                        | 2,47        | W  |
| $e_1=(t_1+\alpha t_1)x(p_1+\lambda p_1)$ | 0,17        | Wh |
| $e_s=p_s x t_s$                          | 0,48        | Wh |
| $e_{\text{Total}}=e_s+(e_1 r)$           | <b>5,74</b> | Wh |

En la Figura 7-14 se representa mediante un histograma la energía entregada al celular de 8 a 19. Se observa que las tareas, que requieren 5,7 Wh, pueden ser ejecutadas en la franja horaria 11 a 16, con un remanente promedio igual a 0,59Wh que se calculó de la siguiente manera  $((6,24-5,74) + (6,38-5,74) + (6,43-5,74) + (6,37-5,74) + (6,27-5,74))/5$ .

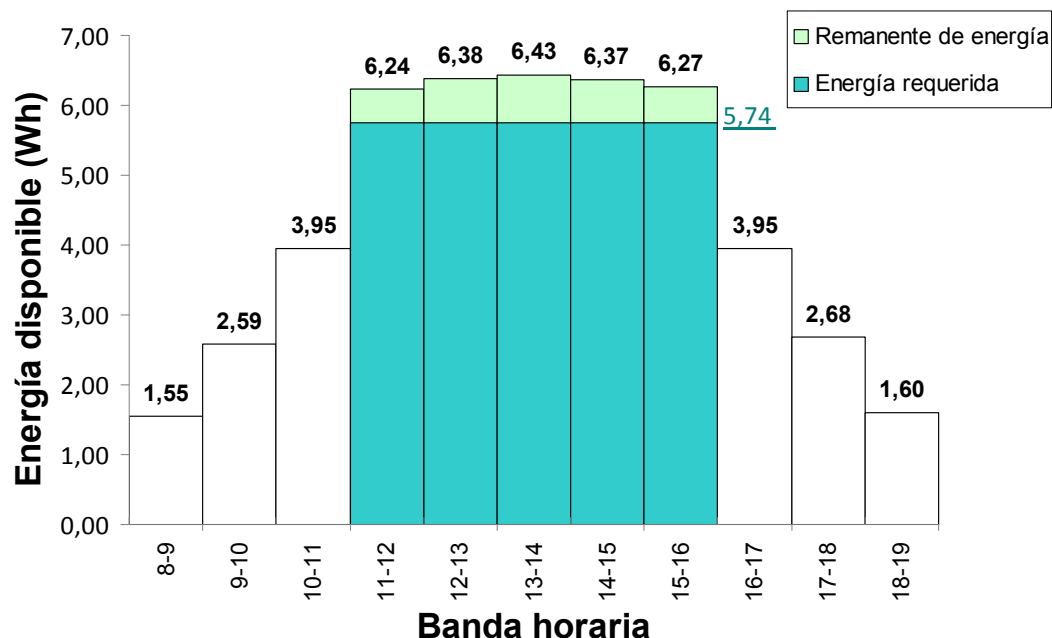


Figura 7-14: Histograma energía disponible/requerida

#### 7.4.4 Planificación de la clase.

Se utilizó la aplicación GIRaSol, instalada en el celular del maestro, para determinar las horas en las cuales se puede realizar la tarea seleccionada por el docente. GIRaSol calculó estos valores de forma automática, utilizando los modelos de energía requerida y disponible. En la Figura 7-15 se muestran capturas de pantalla de GIRaSol, se observa que las tareas se pueden ejecutar de 11 a 16. Para realizar la clase de 120 minutos de duración mediada por dispositivos móviles, se le propusieron al docente las siguientes opciones:

- 11 a 13, utilizando la energía entregada por los paneles.
- 14 a 16, utilizando la energía entregada por los paneles.
- 16 a 18, utilizando energía acumulada en las baterías de los celulares. En este caso se aprovecha la energía entregada por los paneles para cargar las baterías en las horas del día con elevada radiación solar (10 a 16).

El profesor seleccionó la franja horaria 11 a 13 para realizar la experiencia educativa.



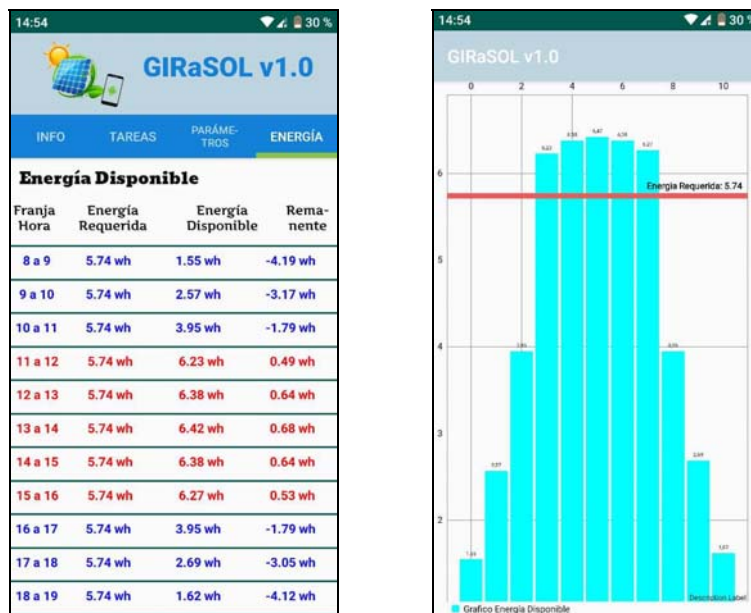


Figura 7-15: GIRA SOL – Energía entregada por hora

#### 7.4.5 Configuración de los dispositivos móviles

Los celulares fueron especialmente preparados para minimizar el consumo de batería, se procedió entonces a: Desinstalar las aplicaciones no indispensables para su funcionamiento, deshabilitar dispositivos de hardware no utilizados en las pruebas, deshabilitar los radios de comunicación no utilizados y desactivar actualizaciones automáticas de Sistema y aplicaciones a través de Google Play.

Se realizó una carga previa, asegurando que las baterías de los dispositivos se encuentren en un nivel de carga de 50%. Esto para verificar, al finalizar la experiencia, si la energía entregada por los paneles fue suficiente o si se utilizó energía acumulada en las baterías.

Se configuró el nivel de brillo a “alto” en todos los celulares, según los parámetros utilizados para aplicar el modelo ( $B=3$ ).

#### 7.4.6 Configuración del escenario de comunicaciones.

Siguiendo las recomendaciones para la cantidad de nodos (apartado 4.3.7), se utilizó el escenario Wifi Mobile Hotspot (Figura 7-16). Este escenario posibilita a los dispositivos móviles acceder a contenido digital alojado en servidores Web de Internet, consumiendo menos energía respecto de la conexión directa a la red celular. Uno de los nodos (maestro) se conecta en forma directa a Internet utilizando los servicios de la red celular, mientras que el resto de los nodos lo hacen a través del nodo maestro que actúa como pasarela de comunicación entre la red Wifi y la red celular.



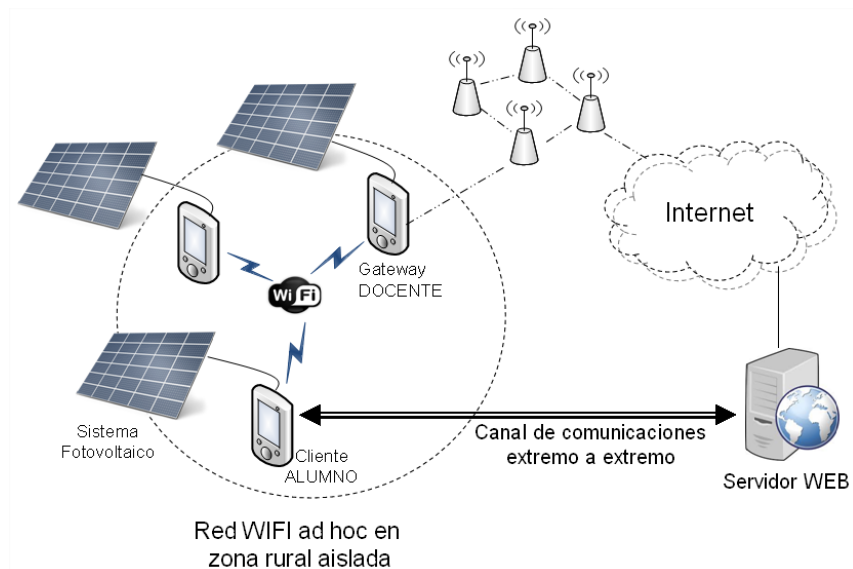


Figura 7-16: Escenario de comunicaciones para la experiencia educativa

Para configurar el escenario en la escuela se procedió a:

- Conectar el dispositivo Gateway al panel del prototipo fotovoltaico.
- Conectar los dispositivos cliente a paneles fotovoltaicos simples, direccionado cada panel para optimizar la incidencia de la radiación solar sobre el mismo.
- Configurar el celular del profesor en modo Wifi Mobile Hotspot.
- Configurar los dispositivos de los alumnos en modo cliente Wifi y conectarlos al Gateway.
- Verificar el acceso a Internet desde los dispositivos cliente.

#### 7.4.7 Desarrollo de la clase

El maestro dictó su clase y al finalizar los alumnos respondieron el cuestionario, con preguntas asociadas a los temas expuestos en la misma, utilizando los dispositivos móviles para acceder a contenidos educativos en Internet (Figura 7-17).



Figura 7-17: Alumnos de la escuela utilizando celulares para responder los cuestionarios, con la colaboración de estudiantes de la Universidad Nacional de Salta

## 7.5 Resultados

GIRaSol posibilitó la correcta planificación de una clase con acceso a contenidos educativos digitales en función de la energía disponible. La configuración y parametrización realizada en GIRaSol puede ser utilizada para planificar nuevas clases mediadas por TIC en la escuela El Rosal.

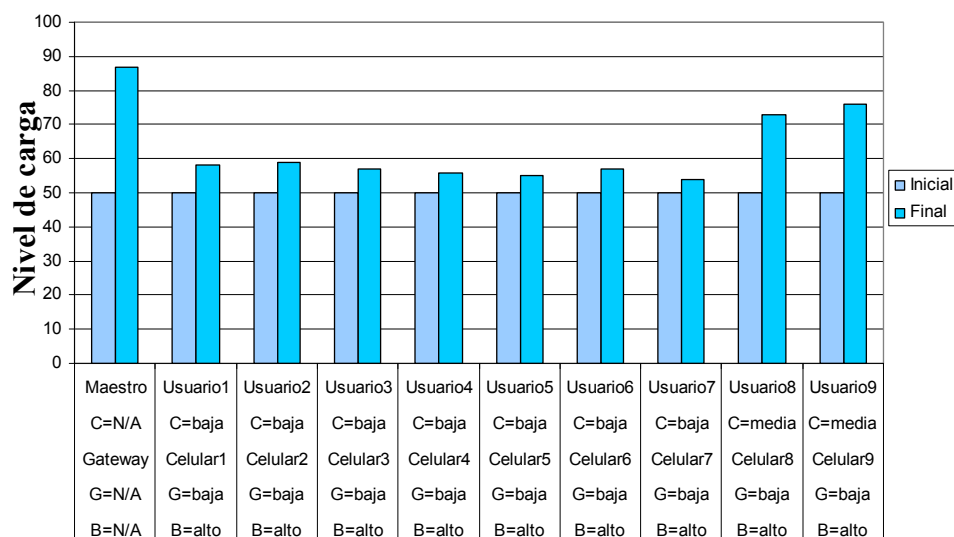


Figura 7-18: Carga inicial y final por dispositivo

Al finalizar la experiencia se verificó el nivel de carga de batería en los dispositivos, que en los nueve dispositivos estaba por sobre el 50% (Figura 7-18). Lo que significa que la energía entregada por los paneles alcanzó para ejecutar las tareas de la experiencia educativa, y además generó un remanente que se acumuló en la batería de los celulares. Este remanente fue aprovechado por los alumnos para realizar actividades recreativas utilizando los dispositivos móviles fuera del horario de clases. En el caso del Gateway, que no fue utilizado para realizar tareas, el nivel de carga alcanzó un 87%.

El despliegue del escenario de comunicaciones permitió a los alumnos acceder a los contenidos digitales de manera fácil, rápida y transparente, de tal forma que no fue necesario que los alumnos posean conocimientos de redes para manejar la aplicación elegida para navegar por Internet (Mint).

El uso de la tecnología generó un ambiente de entusiasmo y colaboración, los alumnos trabajaron interactuando permanentemente entre sí y también con los profesores. Los 9 alumnos respondieron el cuestionario en forma correcta y dentro de los límites de tiempo establecidos por el profesor.

Algunos alumnos tenían experiencia previa en el uso de aplicaciones móviles, ya que son propietarios de celulares. Estos alumnos manifestaron interés en el uso de sus dispositivos como recurso de aprendizaje dentro y fuera del aula.

Los miembros de la comunidad educativa (maestros, alumnos y padres de familia) manifestaron interés en el sistema fotovoltaico utilizado para la recarga de las baterías de los dispositivos y en trasladar esta tecnología a sus hogares. La escuela el Rosal, con

financiamiento propio, compró equipamiento (paneles fotovoltaicos y componentes del prototipo) que fue instalado por estudiantes de la Universidad Nacional de Salta en el marco de un proyecto de investigación.

Se realizaron entrevistas al director y a los maestros del establecimiento educativo, quienes manifestaron que veían esta experiencia como algo novedoso que motiva a los alumnos y permite mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

La experiencia permitió integrar a estudiantes universitarios de ámbitos urbanos con niños de zonas rurales aisladas, compartiendo experiencias en un ambiente de trabajo lleno de entusiasmo. Todos los participantes vivimos momentos inolvidables que se resumen en este video: <https://www.youtube.com/watch?v=czjyRr8H3uw>

## Capítulo 8: Conclusiones y Discusión

Los modelos de energía requerida y disponible funcionaron correctamente en zonas aisladas, los parámetros elegidos facilitaron la adaptación de los modelos a las características de cada zona. La variable margen de error permite realizar un ajuste en función del nivel de precisión que se requiera en la estimación.

El prototipo de medición y la aplicación móvil, facilitan la parametrización y uso de los modelos en zonas aisladas de una manera muy simple e intuitiva, esto permite que sean los habitantes de estas zonas los que apliquen los modelos en sus comunidades, en función de sus necesidades energéticas.

Los resultados obtenidos al contrastar diferentes escenarios de despliegue de redes móviles permiten concluir que el uso de las tecnologías Bluetooth (WPAN) o Wifi (Hotspot) en zonas aisladas introduce mejoras en la comunicación que reducen el consumo de energía sin afectar el rendimiento de los dispositivos móviles.

En las zonas rurales aisladas la instalación de redes eléctricas tiene un elevado costo debido a las distancias, a las dificultades de acceso y al escaso número de pobladores. El equipamiento fotovoltaico presentado apunta a solucionar esta carencia con una propuesta sustentable de bajo costo, haciendo uso de componentes económicos y energía renovable. Por sus características técnicas se constituye en una alternativa ideal para regiones aisladas, se destacan las siguientes: trabaja con energía continua evitando el uso de un costoso inversor, minimiza el desperdicio de energía al optimizar la potencia entregada al dispositivo, la portabilidad facilita su traslado a diferentes lugares y permite mejorar el ángulo de incidencia de la radiación solar para incrementar el rendimiento, no contamina el medioambiente ya que no utiliza baterías y no requiere de mantenimiento en sitio.

Existe además otra cuestión muy importante y es la de la sostenibilidad. Si se piensa en el desarrollo sustentable como algo que sugiera equilibrio, conservación de los recursos y capacidad para mantener los proyectos con muy poco o casi nulo apoyo externo, los cargadores solares portátiles y el prototipo en particular están diseñados para que puedan ser administrados por los usuarios, y que se sustenten con los recursos financieros disponibles en sus propias comunidades. La sostenibilidad es importante, porque los servicios, las tecnologías y la información que se introduce con recursos externos, sólo tienen éxito si son institucionalmente viables, pueden reproducirse y son capaces de sobrevivir con apoyo y recursos locales. Por otra parte, la sostenibilidad también significa personas para las cuales esos servicios, técnicas e información sean accesibles, tengan aplicación y resulten beneficiosos.

La reducción y optimización del consumo energético en dispositivos móviles posibilitó su uso en zonas rurales aisladas aprovechando la energía solar disponible, incrementando las posibilidades de comunicación y acceso a información digital a sus pobladores y contribuyendo a reducir la brecha digital existente entre regiones rurales aisladas y zonas urbanas; procurando una mejora en su calidad de vida.

La aplicación de esta investigación generó un significativo impacto social en las comunidades rurales aisladas donde se desarrolló el trabajo experimental. A continuación se presentan los hallazgos y aportes más relevantes.

Desde el punto de vista educativo, el uso de dispositivos móviles abastecidos con energía solar fotovoltaica se constituye como una alternativa tecnológica que contribuye al proceso de enseñanza aprendizaje en comunidades escolares rurales aisladas, posibilitando a los docentes el empleo de TIC y acercando las tecnologías de la información y comunicación a niños y niñas de estas comunidades.

Si se proporcionan computadoras y/o celulares con acceso a Internet a través del programa Conectar Igualdad, es indispensable garantizar una fuente de energía para estos equipos. El equipamiento fotovoltaico presentado se constituye en una alternativa a considerar, ya que puede ser adquirido a bajo costo comercial para ser provisto a las escuelas.

La capacitación del personal de las escuelas, ya sean directores, docentes, auxiliares, etc., resulta imprescindible para el éxito de la experiencia educativa. Tiene por finalidad asegurar que la comunidad educativa actúe protagónicamente en la utilización de los equipos, haciéndose copartícipe de la transferencia de la tecnología y en alguna medida “propietarios del conocimiento”. Conviene insistir en este hecho, ya que sin su participación es imposible lograr que el desarrollo tecnológico pueda ser aprovechado.

El uso de la energía solar fotovoltaica no solamente posibilita el uso de dispositivos móviles en escuelas que no tienen acceso a la energía eléctrica, sino que de forma indirecta introduce las energías renovables en la vida de estas comunidades educativas, pudiendo concientizar a docentes y alumnos sobre las ventajas del uso de una fuente de energía renovable.

El remanente de energía entregado por los paneles, puede ser almacenado en las baterías de los dispositivos y aprovechado por los niños albergados para realizar actividades recreativas fuera de los horarios de clase. Los celulares, en este caso, son un medio de entretenimiento para combatir el aburrimiento que produce el aislamiento; en especial cuando las condiciones del clima no permiten realizar actividades al aire libre.

Por tratarse de comunidades dispersas, el uso de dispositivos móviles en la escuela resulta fundamental para promover el uso de los mismos en zonas rurales aisladas. Las habilidades que adquieran los niños en el manejo de los dispositivos pueden ser transmitidas, cuando regresen a sus hogares, al resto de los integrantes de su familia y a los habitantes de parajes vecinos. Asimismo, el uso de paneles de tamaño y peso reducido permite que cada alumno pueda trasladar un panel a su hogar para recargar los celulares de otros integrantes de su núcleo familiar, promoviendo la utilización de energías renovables.

Cabe mencionar y destacar el sacrificio y la vocación de servicio de los docentes de escuelas rurales aisladas, que en algunos casos tienen que caminar horas para llegar a sus escuelas, donde permanecen aislados durante varios días [76]. La aplicación de la investigación realizada en esta tesis, no solo permite a estos docentes incorporar estrategias educativas mediadas por dispositivos móviles en sus clases, sino también reduce de manera considerable el equipaje que debe portear hasta la escuela, ya que algunos libros o materiales pueden ser reemplazados por contenidos digitales.

Respecto a los pobladores de zonas rurales aisladas y su relación con los dispositivos móviles, no se detectaron usuarios de capacidad alta, solamente unos cuantos de capacidad media, y la gran mayoría con capacidad de manejo baja. Esto se debe a que los habitantes de estas zonas, utilizan sus celulares de forma muy limitada por lo que no adquieren habilidades de manejo. El uso de mecanismos para reducir el consumo de energía y cargadores solares portátiles, permitirá que estos usuarios hagan uso continuo de sus dispositivos y adquieran habilidades que mejoren su capacidad de manejo.

Pese a las condiciones socio económicas y de aislamiento de estas zonas, es sorprendente la cantidad de personas que son dueñas de un dispositivo móvil. Si bien la mayor parte de los dispositivos son de gama baja, se pueden encontrar algunos de gama media y alta. El celular se ha convertido en un objeto de “status social”, que utilizan para sentirse parte de un mundo virtual que los integra momentáneamente. Muchos de los celulares son utilizados como reproductores de música o cámaras fotográficas y no como dispositivos de comunicación. Con la introducción del Conectar Igualdad II, los jóvenes de las escuelas tendrán la oportunidad de acceder a dispositivos móviles de gama media para realizar actividades educativas, esto implica un consumo energético superior, que está contemplado en el modelo de consumo presentado.

El ancho de banda disponible en zonas aisladas es muy reducido, si bien alcanza para brindar acceso a Internet, introduce retardos y retransmisiones en la comunicación que incrementan el consumo de energía en los dispositivos móviles. Ante esto, es primordial mejorar las posibilidades de comunicación de los pobladores de estas regiones, se requiere el recambio tecnológico y la instalación de antenas por parte de las empresas prestadoras de servicios. Existen otras opciones como internet satelital, o radioenlaces punto a punto, que por su elevado costo son inviables para este tipo de zonas.

La cuarentena generada por el Covid-19 ha puesto aún más en evidencia la brecha digital existente entre zonas urbanas y rurales aisladas. Debido a las medidas de aislamiento social las escuelas permanecen cerradas. Mientras que en los centros educativos urbanos se realizan actividades virtuales y se continúa con el dictado en colaboración con padres de familia, la educación en las escuelas rurales aisladas está completamente interrumpida, ya que los alumnos no cuentan con instalaciones fotovoltaicas en sus hogares y no pueden ingresar a las escuelas para cargar las baterías de sus dispositivos. Su realidad es todavía más dura en caso de emergencias (enfermedades o accidentes), al no poder comunicarse tienen que transitar un largo recorrido hasta el centro de salud más cercano, en la mayoría de los casos caminando. Se hace indispensable brindar a estas familias paneles de bajo costo con las características presentadas en el apartado 5.2.2 para recargar sus dispositivos móviles y también mejorar sus posibilidades de comunicación ampliando la cobertura de red celular en zonas rurales aisladas de población dispersa.

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 1-1: Vivienda ubicada en una zona rural aislada del NOA</i>  | 1  |
| <i>Figura 1-2: Ejes de la investigación</i>  | 3  |
| <i>Figura 2-1: Energía en función de la Potencia</i>   | 8  |
| <i>Figura 2-2: Potencia vs Energía</i>   | 9  |
| <i>Figura 2-3: Eficiencia energética en aplicaciones móviles</i>   | 10 |
| <i>Figura 2-4: Android Frequency Governors</i>   | 11 |
| <i>Figura 2-5: Batería alimentando un circuito</i>   | 11 |
| <i>Figura 2-6: Recarga de una batería</i>  | 11 |
| <i>Figura 2-7 : Ciclo de carga de una batería de iones de litio</i>  | 13 |
| <i>Figura 2-8: Voltajes de carga a diferentes temperaturas.</i>  | 16 |
| <i>Figura 2-9: Curva de descarga de baterías LiPo en función de la temperatura</i>                                   | 17 |
| <i>Figura 2-10 : Evolución de la tecnología Quick Charge</i>   | 21 |
| <i>Figura 2-11 : Ejemplo de modelo de consumo de energía</i>   | 24 |
| <i>Figura 2-12: Sistema de medición de alta precisión</i>  | 24 |
| <i>Figura 2-13: Medición del consumo energético a nivel circuito</i>   | 25 |
| <i>Figura 2-14: Tiempo de vida de la batería para una combinación de 4 factores de contexto</i>                      | 26 |
| <i>Figura 2-15: Arquitectura del proyecto CARAT</i>  | 28 |
| <i>Figura 2-16: Comparación de distribuciones de consumo</i>   | 28 |
| <i>Figura 2-17: Instancias de carga</i>  | 29 |
| <i>Figura 2-18: Medición del consumo de energía con Power Monitor</i>  | 31 |
| <i>Figura 2-19: Medición con un Power Meter</i>  | 31 |
| <i>Figura 2-20: Powertutor. Estadísticas de consumo de energía “por aplicación”</i>                                  | 33 |
| <i>Figura 2-21: Sensores incorporados en los procesadores Snapdragon</i>   | 35 |
| <i>Figura 2-22: Trepn Profiler. Consumo de energía en mW de una aplicación en función del tiempo</i>                 | 36 |
| <i>Figura 2-23: Snapdragon profiler – Correlación de recursos</i>  | 37 |
| <i>Figura 2-24: Snapdragon profiler – Planificación de la CPU</i>  | 37 |
| <i>Figura 2-25: Canal extremo a extremo con enlaces de diferentes tamaños</i>  | 39 |
| <i>Figura 2-26: Ping desde un emulador de terminal para Android</i>  | 40 |
| <i>Figura 2-27: Iperf para Android</i>   | 43 |
| <i>Figura 2-28 : Módulo fotovoltaico con 36 celdas en serie</i>  | 45 |
| <i>Figura 2-29: Detalle de celdas en Módulos Fotovoltaicos</i>   | 46 |
| <i>Figura 2-30: Módulo Fotovoltaico</i>  | 46 |
| <i>Figura 2-31: Tensión de circuito abierto y corriente de cortocircuito</i>   | 47 |
| <i>Figura 2-32: Curva de Intensidad-Voltaje (I-V)</i>  | 48 |
| <i>Figura 2-33: Curvas I-V para diferentes niveles de radiación</i>  | 50 |
| <i>Figura 2-34: Curvas I-V para diferentes temperaturas</i>  | 51 |
| <i>Figura 2-35: Curvas de potencia para diferentes temperaturas</i>  | 51 |
| <i>Figura 2-36: coeficiente de temperatura según <math>I_{sc}</math>, <math>V_{oc}</math> y <math>P_{max}</math></i> | 52 |
| <i>Figura 2-37: Incidencia de la temperatura en la potencia entregada por un panel</i>                               | 53 |
| <i>Figura 2-38: Hora Solar Pico (HSP)</i>  | 55 |
| <i>Figura 2-39: Radiación solar para Salta Capital</i>   | 56 |
| <i>Figura 2-40: Conexión de celdas en serie</i>  | 57 |
| <i>Figura 2-41: Conexión de celdas en paralelo</i>   | 57 |
| <i>Figura 2-42: Conexión mixta, en serie y paralelo</i>  | 58 |
| <i>Figura 2-43: Cargadores solares con y sin batería</i>   | 59 |
| <i>Figura 2-44: Sistema portable de energía</i>  | 59 |
| <i>Figura 2-45: Uso de reguladores de carga</i>  | 60 |
| <i>Figura 3-1: Escuela N° 76 de Molulo</i>   | 62 |
| <i>Figura 3-2: Diagrama de flujo del procedimiento de medición</i>   | 65 |
| <i>Figura 3-3: Construcción del modelo de consumo</i>  | 66 |
| <i>Figura 3-4: Construcción del modelo de energía disponible</i>   | 67 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4-1: Caracterización del consumo en Treprn Profiler.....  | 70  |
| Figura 4-2: Consumo energético de una aplicación incluyendo la energía base .....                                    | 70  |
| Figura 4-3: Consumo en modo standby .....  | 71  |
| Figura 4-4: Consumo energético ejecutando una aplicación .....   | 71  |
| Figura 4-5: Consumo energético de una tarea, sin considerar la energía en Standby.....                               | 72  |
| Figura 4-6: Eficiencia energética para realizar una tarea en un dispositivo móvil .....                              | 73  |
| Figura 4-7: Gráficos generados por la aplicación Network Signal Info .....   | 77  |
| Figura 4-8: Conexión directa.....  | 78  |
| Figura 4-9: Piconet bluetooth .....  | 79  |
| Figura 4-10: Pairing Bluetooth.....  | 80  |
| Figura 4-11: Acceso a Internet por Bluetooth .....   | 80  |
| Figura 4-12: Mobile hotspot .....  | 81  |
| Figura 4-13: Configuración del Hotspot.....  | 82  |
| Figura 4-14: Procedimiento para medir el rendimiento y el consumo energético en los escenarios de comunicación ..... | 83  |
| Figura 4-15: Latencia promedio para diferentes escenarios de 5 nodos.....  | 85  |
| Figura 4-16: Throughput para tráfico TCP generado por IPerf .....  | 85  |
| Figura 4-17: Consumo de energía para tráfico TCP generado por IPerf.....   | 86  |
| Figura 4-18: Consumo de energía para una piconet de 5 nodos .....  | 86  |
| Figura 4-19: consumo de energía para una red Wifi Mobile Hotspot de 5 nodos .....                                    | 87  |
| Figura 4-20: Consumo promedio de los nodos cliente para cada escenario .....   | 87  |
| Figura 5-1: Consumo energético de una tarea .....  | 91  |
| Figura 5-2: Cálculo de la potencia promedio.....   | 92  |
| Figura 5-3: Incremento de tiempo.....  | 92  |
| Figura 5-4: Incremento de potencia.....  | 93  |
| Figura 5-5: Potencia recibida del sol por unidad de superficie .....   | 108 |
| Figura 5-6: Mediodía solar.....  | 109 |
| Figura 5-7: Radiación por hora del día.....  | 110 |
| Figura 5-8: Energía entregada y aprovechada por hora del día.....  | 114 |
| Figura 5-9: Esquema del prototipo.....   | 114 |
| Figura 6-1: Configuración 1 x 36 .....   | 118 |
| Figura 6-2: Curva IV para configuración 1x36 .....   | 119 |
| Figura 6-3: Configuración 2x18 .....   | 119 |
| Figura 6-4: Curva IV para una configuración 2x18.....  | 120 |
| Figura 6-5: Configuración 3x12 .....   | 120 |
| Figura 6-6: Curva IV para una configuración 3x12.....  | 121 |
| Figura 6-7: Prototipo para gestionar la energía disponible.....  | 122 |
| Figura 6-8: Arduino UNO R3 .....   | 123 |
| Figura 6-9: Conexión de Arduino – Módulo SD.....   | 124 |
| Figura 6-10: Conexión de Arduino – DS3231 .....  | 125 |
| Figura 6-11: Variación de la tensión en función de la corriente en el circuito ACS712.....                           | 126 |
| Figura 6-12: Conexión de sensor ACS712.....  | 127 |
| Figura 6-13: Conexión de Arduino - DHT22.....  | 127 |
| Figura 6-14: Conexión OTG entre un dispositivo móvil y una placa Arduino .....                                       | 129 |
| Figura 6-15: GIRA Sol - Gestión Inteligente de Recarga Solar .....   | 130 |
| Figura 6-16: GIRA Sol - Salida .....   | 130 |
| Figura 6-17: GIRA Sol - Selección de tareas .....  | 131 |
| Figura 6-18: GIRA Sol - Carga de parámetros .....  | 131 |
| Figura 6-19: GIRA Sol - cálculo de coeficientes de proporción .....  | 131 |
| Figura 7-1: Ubicación geográfica del establecimiento educativo “4526” .....  | 133 |
| Figura 7-2: Paraje El Rosal.....   | 133 |
| Figura 7-3: Cocinas Solares en el Rosal.....   | 133 |
| Figura 7-4: Calefón solar en el Rosal.....   | 133 |
| Figura 7-5: Comunidad educativa de El Rosal.....   | 134 |
| Figura 7-6: Participantes de la experiencia educativa .....  | 134 |
| Figura 7-7: Energía entregada por hora .....   | 136 |



|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 7-8: GIRaSol – Carga de parámetros .....</i>  | <i>137</i> |
| <i>Figura 7-9: Radiación solar en el Rosal [48] .....</i>   | <i>137</i> |
| <i>Figura 7-10: Ficha técnica del panel Jiawei 10P .....</i>  | <i>138</i> |
| <i>Figura 7-11: Consumo en modo standby .....</i>   | <i>138</i> |
| <i>Figura 7-12: Caracterización del consumo para Mint con Trepn Profiler.....</i>   | <i>139</i> |
| <i>Figura 7-13: Alumna ejecutando las pruebas para parametrizar GIRaSol. ....</i>   | <i>140</i> |
| <i>Figura 7-14: Histograma energía disponible/requerida.....</i>  | <i>142</i> |
| <i>Figura 7-15: GIRaSol – Energía entregada por hora.....</i>   | <i>143</i> |
| <i>Figura 7-16: Escenario de comunicaciones para la experiencia educativa .....</i>   | <i>144</i> |
| <i>Figura 7-17: Alumnos de la escuela utilizando celulares para responder los cuestionarios, con la colaboración de estudiantes de la Universidad Nacional de Salta .....</i> | <i>144</i> |
| <i>Figura 7-18: Carga inicial y final por dispositivo .....</i>   | <i>145</i> |

## Lista de Tablas

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 2-1: Tecnologías de carga rápida en el mercado .....                                       | 18  |
| Tabla 2-2: Versiones de la tecnología Quick Charge .....   | 19  |
| Tabla 2-3: Características eléctricas del conector USB Tipo-C.....                               | 20  |
| Tabla 2-4: Herramientas utilizadas para medir el consumo de energía.....                         | 30  |
| Tabla 2-5: Cuestiones a considerar para diseñar una red, optimizando el consumo de energía ..... | 32  |
| Tabla 2-6: Estados de energía que influyen en el consumo de energía de un dispositivo móvil..... | 34  |
| Tabla 2-7: Métricas de rendimiento.....  | 38  |
| Tabla 2-8: Diferencias entre ancho de banda y throughput.....                                    | 39  |
| Tabla 2-9: Aplicaciones utilizadas para obtener las métricas de rendimiento .....                | 40  |
| Tabla 2-10: Ejemplo de uso de Iperf.....   | 42  |
| Tabla 2-11: Tecnologías de celdas.....   | 45  |
| Tabla 2-12: Eficiencia de un panel solar fotovoltaico .....                                      | 49  |
| Tabla 2-13: Mediciones realizadas sobre un panel fotovoltaico.....                               | 56  |
| Tabla 3-1: Escuelas rurales aisladas del NOA .....   | 63  |
| Tabla 4-1: Tareas de uso frecuente en zona rural y aplicaciones para ejecutarlas.....            | 72  |
| Tabla 4-2: Eficiencia energética para realizar una tarea.....                                    | 73  |
| Tabla 4-3: Tasa de datos máxima teórica para las tecnologías de celular.....                     | 75  |
| Tabla 4-4: Configuración del Servidor .....  | 75  |
| Tabla 4-5: Configuración de los dispositivos móviles Cliente .....                               | 76  |
| Tabla 4-6: Características del escenario comunicación directa.....                               | 78  |
| Tabla 4-7: Características del escenario Piconet Bluetooth.....                                  | 79  |
| Tabla 4-8: Características del escenario Mobile Hotspot .....                                    | 81  |
| Tabla 4-9: Aplicaciones utilizadas para los tests.....   | 82  |
| Tabla 4-10: Tests realizados para 5 nodos .....  | 82  |
| Tabla 4-11: Ventajas y desventajas de los escenarios de comunicación .....                       | 88  |
| Tabla 5-1: Dispositivos utilizados .....   | 97  |
| Tabla 5-2: Potencia promedio para cada combinación Brillo/Gama.....                              | 97  |
| Tabla 5-3: Proporción adicional de potencia .....  | 98  |
| Tabla 5-4: Tareas de uso frecuente en zona rural y aplicaciones para ejecutarla .....            | 98  |
| Tabla 5-5: Valor medio de la tasa de incremento de potencia $\lambda$ .....                      | 99  |
| Tabla 5-6: $\lambda$ en función de $\lambda_1$ y $\lambda_2$ .....                               | 99  |
| Tabla 5-7: Métricas para el nivel de interacción de una aplicación.....                          | 100 |
| Tabla 5-8: Nivel de interacción para tareas de uso frecuente en zonas rurales aisladas.....      | 101 |
| Tabla 5-9: Parámetros del modelo de consumo de energía.....                                      | 104 |
| Tabla 5-10: Consumo estimado vs Consumo medido.....  | 107 |
| Tabla 5-11: Radiación solar en Salta Capital.....  | 108 |
| Tabla 7-1: Datos almacenados en el archivo LOG.....  | 135 |
| Tabla 7-2: Factores de proporción y energía por hora .....                                       | 136 |
| Tabla 7-3: Capacidad de manejo por usuario .....   | 140 |
| Tabla 7-4: Tabla de parámetros.....  | 141 |

## Lista de Acrónimos y Abreviaciones

| Acrónimo   | Ingles   | Español   |
|------------|--|---|
| 2G         | Second generation                              | Segunda Generación  |
| 3G         | Third generation                               | Tercera Generación  |
| 3GPP       | 3rd Generation Partnership Project             |   |
| 3GPP2      | 3rd Generation Partnership Project 2           |   |
| ADB        | Android Debug Bridge                           |   |
| BLUETOOTH  |  | Tecnología de comunicación para redes inalámbricas de área personal |
| BNEP       | Bluetooth Networking Encapsulation Protocol    |   |
| CA         | Certification Authority                        |   |
| CDP        | Charging Downstream Port                       |   |
| CPU        | Central Processing Unit                        | Unidad central de procesamiento                                     |
| DCP        | Dedicated Charging Port                        | Puerto de carga dedicado  |
| DSP        | Digital Signal Processor                       | Procesador de señales digitales                                     |
| DVFS       | Dynamic Voltage and Frequency Scaling          | Escalado dinamico de voltaje y frecuencia                           |
| DVS        | Dynamic Voltage Scaling                        | Escalado dinamico de voltaje  |
| EDGE       | Enhanced Data rates for GSM Evolution          |   |
| GPRS       | General Packet Radio Service                   |   |
| GPS        | Global Positioning System                      |   |
| GPU        | Graphics Processing Unit                       | Coprocesador dedicado al procesamiento de gráficos                  |
| GSM        | Global System Mobile                           |   |
| HOTSPOT    |  | Dispositivo que brinda acceso a internet                            |
| HSP        |  | Hora Solar Pico   |
| HSPA       | High-Speed Packet Access                       |   |
| HTTP       | Hypertext Transfer Protocol                    |   |
| ICMP       | Internet Control Message Protocol              |   |
| INOV       | Intelligent Negotiation for Optimum Voltage    |   |
| IP         | Internet Protocol                              |   |
| ISO        | International Organization for Standardization |   |
| LAN        | Local Area Network                             | Red de área local   |
| Li-Ion     | Lithium ion batteries                          | batería de Iones de litio   |
| LiPo       | Lithium polymer battery                        | batería de Polímeros de litio                                       |
| LTE        | Long Term Evolution                            | Evolución a Largo Plazo   |
| M-LEARNING | Mobile Learning                                | Aprendizaje electrónico móvil                                       |
| NOA        |  | Noroeste de Argentina   |
| OTG        | On The Go                                      |   |
| PERMER     |  | Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales                 |
| PICONET    |  | Red de dispositivos conectados utilizando Bluetooth                 |

|            |  |   |
|------------|--|---|
| QC         | Quick Charge                               | Carga rápida                                    |
| RSSI       | Received Signal Strength Indicator         | Indicador de fuerza de la señal recibida        |
| RTT        | Round Trip Time                            | Tiempo de ida y vuelta                          |
| SD Card    | Secure Digital Card                        |   |
| SDP        | Standard Downstream Port                   |   |
| SIN        |  | Sistema Interconectado Nacional                 |
| SMARTPHONE |  | Teléfono inteligente                            |
| SPI        | Serial Peripheral Interface                |   |
| SSL        | Secure Sockets Layer                       |   |
| STC        | Standard Test Conditions                   |   |
| TCP        | Transmission Control Protocol              |   |
| TIC        |  | Tecnologías de la información y la comunicación |
| TONC       |  | Temperatura de operación nominal de la celda    |
| UMTS       | Universal Mobile Telecommunications System | Sistema universal de telecomunicaciones móviles |
| USB        | Universal Serial Bus                       |   |
| USB-PD     | USB Power delivery                         |   |
| WCDMA      | Wideband CDMA                              |   |
| Wifi       | Wireless Fidelity                          | Sistema de conexión inalámbrica                 |
| WLAN       | Wireless Local Area Network                | Red inalámbrica de área local                   |
| WMAN       | Wireless Metropolitan Area Network         | Red inalámbrica de área metropolitana           |
| WPANs      | Wireless Personal Area Network             | Red inalámbrica de área personal                |

## Bibliografía

1. Rocabado, Sergio; Sanchez, Ernesto; Diaz, Javier y Arias, Daniel. (2013). *Caso de estudio de comunicaciones seguras sobre redes móviles ad hoc*. Paper presented at the CACIC 2013, Mar del Plata - Buenos Aires - Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/31244>
2. Rocabado, Sergio; Cadena, Carlos. (2015). *Uso de dispositivos móviles inteligentes en zonas rurales aisladas abastecidas con energía solar fotovoltaica*. Paper presented at the CACIC 2015.
3. Rocabado, Sergio; Cadena, Carlos; Ottavianelli, Emilce. (2018). *Propuesta para el uso de TDICs en comunidades educativas rurales. Una experiencia en escuelas albergue*. Paper presented at the CONGRESSO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO. CBIE 2017, Recife - Brasil. ISSN 2316-6533.
4. Rocabado, Sergio, & Cadena, Carlos. (2016). *Mini sistemas fotovoltaicos para el uso de dispositivos móviles en zonas rurales: Optimización de la potencia entregada y consumida*. Paper presented at the Congreso Brasileiro de Energía Solar - CBENS 2016.

5. Rocabado, Sergio, & Cadena, Carlos. (2015). *Cargadores solares portátiles para el uso de dispositivos móviles en zonas rurales aisladas del NOA*. Paper presented at the ASADES 2015.
6. Shearer, Findlay. (2008). *Power Management in Mobile Devices: A view of energy conservation* (pp. 337).
7. SHEARER, Findlay. (2008). Hierarchical View of Energy Conservation. In Elsevier (Ed.), *Power Management in Mobile Devices*. United States of America: ELSEVIER.
8. Banerjee, Sarbartha, & John, Lizy Kurian. (2018, 2018//). *Characterization of Smartphone Governor Strategies*. Paper presented at the Euro-Par 2018: Parallel Processing, Cham.
9. Battery University. (2017). from <https://batteryuniversity.com>
10. Battery University. (2018). <https://batteryuniversity.com>.
11. Betta Batteries. (2018). from <http://bettabatteries.com/>
12. OPPO. (2019). from <https://www.oppo.com/au/about-us/press/everything-you-need-to-know-about-supervooc/>
13. Digital Trends - Fast charging technologies. (2019). from <https://www.digitaltrends.com/mobile/how-does-fast-charging-work/>
14. Qualcomm. (2019). Quickcharge Technology. <https://www.qualcomm.com/solutions/mobile-computing/features/quick-charge>.
15. USB Implementers Forum, (USB-IF). (2018). Universal Serial Bus Type-C and Power Delivery Source Power Requirements Test Specification. <https://www.usb.org>.
16. Qualcomm. (2018). Quick Charge 4. <https://www.qualcomm.com/news/onq/2018/02/23/how-can-quick-charge-4-turbocharge-your-mobile-device>.
17. Monsoon Solutions Inc. (2017). Low Voltage Power Monitor. <https://www.msoon.com/powermonitor-support>.
18. ZHANG, Lide; TIWANA, Birjodh; QIAN, Zhiyun and WANG, Zhaoguang. (2010). *Accurate online power estimation and automatic battery behavior based power model generation for smartphones*. Paper presented at the 2010 IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis (CODES+ISSS), Scottsdale, AZ. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5751489>
19. Zhang, Lide. (2013). *Power, Performance Modeling and Optimization for Mobile System and Applications*. (Thesis - Doctor of Computer Science and Engineering), University of Michigan.
20. Thiagarajany, Narendran; Aggarwal, Gaurav; Nicoara, Angela (2012). *Who Killed My Battery: Analyzing Mobile Browser Energy Consumption*. Paper presented at the WWW 2012 – Session: Mobile Web Performance, Lyon, France.
21. Aaron, Carroll; Gernot, Heiser. (2013). *The Systems Hacker's Guide to the Galaxy Energy Usage in a Modern Smartphone*. Paper presented at the 4th Asia-Pacific Workshop on Systems (APSys'13), Singapore.
22. Metri, Grace; Shi, Weisong; Brockmeyer Monica (2015). *EnergyEfficiency Comparison of Mobile Platforms and Applications: A Quantitative Approach*. Paper presented at the HotMobile Santa Fe, NM, USA.

23. Qualcomm Technologies. (2014). Trepn Profiler. from <https://developer.qualcomm.com/mobile-development/increase-app-performance/trepn-profiler>
24. Carroll, Aaron; Heiser, Gernot (2013). *Mobile Multicores: Use Them or Waste Them*. Paper presented at the Proceedings of the 5th Workshop on Power-Aware Computing and Systems (HotPower'13). Pennsylvania, USA.
25. Peltonen, E., Lagerspetz, E., Nurmi, P., & Tarkoma, S. (2015, 23-27 March 2015). *Energy modeling of system settings: A crowdsourced approach*. Paper presented at the 2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom).
26. Cruz, L., & Abreu, R. (2017, 22-23 May 2017). *Performance-Based Guidelines for Energy Efficient Mobile Applications*. Paper presented at the 2017 IEEE/ACM 4th International Conference on Mobile Software Engineering and Systems (MOBILESoft).
27. Oliner, Adam, P. Iyer, Anand, Stoica, Ion, Lagerspetz, Eemil, & Tarkoma, Sasu. (2013). *Carat: collaborative energy diagnosis for mobile devices*.
28. Ferreira, Denzil; Dey, Anind; Kostakos, Vassilis. (2011). *Understanding Human-Smartphone Concerns: A Study of Battery Life*. Paper presented at the Pervasive'11 Proceedings of the 9th international conference on Pervasive computing.
29. GOOGLE Training. (2012). Android PowerManager API Guides. from <http://developer.android.com/reference/android/os/PowerManager.html>
30. GORDON, Mark; ZHANG, Lide and TIWANA, Birjodh. PowerTutor. University of Michigan. Retrieved from <http://ziyang.eecs.umich.edu/projects/powertutor>
31. QUALCOMM. (2012). Trepn Profiler. from <https://developer.qualcomm.com/mobile-development/development-devices/trepn-profiler>
32. Qualcomm Technologies, Inc. (2017). Snapdragon Profiler. <https://developer.qualcomm.com/software/snapdragon-profiler>.
33. QUALCOMM. (2012). Snapdragon™ Mobile Processors. from <https://developer.qualcomm.com/discover/chipsets-and-modems/snapdragon>
34. QUALCOMM. (2012). Snapdragon™ MDP & DragonBoard Mobile Development Devices. from <https://developer.qualcomm.com/mobile-development/development-devices>
35. PATHAK, Abhinav; HU, Charlie and ZHANG, Ming. (2011). *Fine-Grained Power Modeling for Smartphones Using System Call Tracing*. Paper presented at the EuroSys.
36. SPATH, Chris. (2011). *Optimizing Apps For Power and Network Efficiency Using Trepn™ Profiler*. Paper presented at the UPLINQ Conference. <https://www.uplinq.com/2011/sites/default/files/slides/Optimizing-Apps-For-Power-Network-Efficiency-Snapdragon-MDP2.pdf>
37. DUGAN, Jon. (2008). Overview of Network Measurement Tools. Brooklyn, NY: Energy Sciences Network Lawrence Berkeley National Laboratory.
38. MAGICANDROIDAPPS.COM. (2011). Iperf for Android. from <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.magicandroidapps.iperf>
39. JACKPAL. Android Terminal Emulator. Retrieved from <https://github.com/jackpal/Android-Terminal-Emulator>
40. NLANR/DAST. (2012). Iperf project. from <http://sourceforge.net/projects/iperf>

41. GOOGLE. (2011). Google Play - Android Application Market. from <https://play.google.com/store>
42. Secretaría de Energía de la nación. (2008). *Energías Renovables - Energía Solar*
43. Ottavianelli, Emilce; Ibarra Marcelo; Cadena Carlos. (2013). *Uso de indicadores sociales en estudios de factibilidad de instalación de sistemas solares para generación de electricidad en localidades rurales*. Paper presented at the XX Simposio peruano de Energía solar, Tacna – Perú.
44. Secretaria de Energia - Ministerio de Planificación. (2015). PERMER, Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales. from <https://www.se.gob.ar/permer/>
45. Habberlin, Heinrich (2017). *Photovoltaics : system design and practice*. : John Wiley & Sons. ISBN: 9781119992851.
46. Smets, Arno, Jäger, Klaus, Isabella, Olindo, Van Swaaij, R. A. C. M. M., & Zeman, Miro. (2016). *Solar Energy - The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*.
47. Granda-Gutiérrez, Everardo, A Orta, O., Díaz-Guillén, J. C., Jiménez, Marco, Osorio, Mario, & Gonzalez Albarrán, Marco. (2013). *MODELADO Y SIMULACIÓN DE CELDAS Y PANELES SOLARES*.
48. Secretaria de Energía de la Provincia de Salta. (2019). SISOL - Sistema de Información Solar Salta. <http://sisol.salta.gob.ar/>.
49. Texas Instruments. (2015). *Battery Management Guide*. Retrieved from <http://www.ti.com/lit/sg/slyt420c/slyt420c.pdf>
50. Texas Instruments. (2018). LM2596 SIMPLE SWITCHER Step-Down Voltage Regulator. from <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
51. Attia, Y. I. Al-Mashhadany; H. A. (2014). Novel Design and Implementation of Portable Charger through Low-Power PV Energy System. *Advanced Materials Research*, 925, pp. 495-499 (ISSN 1662-8985).
52. Távora, Filipe; Maia, Andrea Sarmento. (2012). *Solar Battery charger for portable devices application*. SiliconReef Consultoria, Pesquisa e Projetos em Tecnologia da Informação. Retrieved from [www.siliconreef.com.br](http://www.siliconreef.com.br)
53. Schuss, C; Rahkonen, T. (2013, 11-15 Nov.). *Solar Energy Harvesting Strategies for Portable Devices such as Mobile Phones*. Paper presented at the 2013 14th Conference of Open Innovations Association (FRUCT) - IEEE, Espoo.
54. Ministerio de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología,. (2018). Mapa Educativo Provincial. from <http://mapa.educacion.gob.ar/tag/mapas-provinciales>
55. Qualcomm Technologies. (2018). TREPn PROFILER. <https://developer.qualcomm.com/software/trepn-power-profiler>.
56. GOOGLE. (2012). Our Mobile Planet. from <http://www.thinkwithgoogle.com/mobileplanet>
57. Hurtado de Barrera, Jacqueline. (2000). El proyecto de investigación : metodología de la investigación holística / Jacqueline Hurtado de Barrera. *SERBIULA (sistema Librum 2.0)*.
58. BALASUBRAMANIAN, Niranjani; BALASUBRAMANIAN, Aruna and VENKATARAMANI, Arun. (2009). *Energy Consumption in Mobile Phones: A Measurement Study and Implications for Network Applications*. Paper presented at the 9th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference.



59. PERRUCCI, Gian Paolo; FITZEKY, Frank and SASOY, Giovanni. (2009). *On the Impact of 2G and 3G Network Usage for Mobile Phones Battery Life*. Paper presented at the European Wireless 2009.
60. NLNR/DAST. (Jul 2012). Iperf 3 Windows executable. from <https://code.google.com/p/iperf3-cygwin/>
61. KAIBITS Software. Network Signal Info. Retrieved from [http://www.kaibits-software.com/product\\_networksignalndonate.htm](http://www.kaibits-software.com/product_networksignalndonate.htm)
62. Rocabado, Sergio; Sanchez, Ernesto; Diaz, Javier y Arias, Daniel. (2012). *Integración Segura de MANETs, desplegadas en zonas de recursos limitados, a Redes de Infraestructura*. Paper presented at the CACIC 2012, Bahia Blanca - Buenos Aires - Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/23762>
63. SPECIAL INTEREST GROUP (SIG) Bluetooth. (2001). Bluetooth Network Encapsulation Protocol (BNEP) Especification.
64. Wireless Fidelity (Wi-Fi). Wi-Fi Protected Access. <http://www.weca.net>.
65. Salama, Dr-Diaa, Abd elkader, Hatem, & Hadhoud, Mohiy M. (2009). Analyzing the Energy Consumption of Security Algorithms for Wireless LANs. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 334-342. doi: 10.7763/IJCTE.2009.V1.53
66. ARDUINO UNO Board. (2015). from <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
67. Mahzan, N. N., Omar, Ahmad, Rimon, L., mohammad noor, Siti, & Rosselan, M. Z. (2017). Design and development of an arduino based data logger for photovoltaic monitoring system. *17*, 15.11-15.15. doi: 10.5013/IJSSST.a.17.41.15
68. Arduino. (2018). Examples from Libraries. from <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/LibraryExamples>
69. Maxim Integrated Products. (2006). *DS3231: Extremely Accurate I2C-Integrated RTC/TCXO/Crystal*. Retrieved from <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-010908-124414/unrestricted/DS3231-DS3231S.pdf>
70. ALLEGRO Microsystem. (2019). ACS712: Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor. <https://www.allegromicro.com/en/Products/Sense/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx>.
71. Wai Mar Myint Aung, Yadanar Win, Nay Win Zaw. (2018). *Implementation of Solar Photovoltaic Data Monitoring System*. International Journal of Science, Engineering and Technology Research. Vol. 7. Issue 8.
72. Bogdan, Mihai. (2016). How to Use the DHT22 Sensor for Measuring Temperature and Humidity with the Arduino Board. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 68. doi: 10.1515/aucts-2016-0005
73. Cao, Miao, & Yin, Peng. (2014). Research of USB OTG Technology in Image High-Speed Data Transfer. *Advanced Materials Research*, 951, 261-264. doi: 10.4028/[www.scientific.net/AMR.951.261](http://www.scientific.net/AMR.951.261)
74. Magadán, C. (2008). *Las Tic en Escuelas rurales de La Argentina*. Las TIC: del aula a la agenda política, Ponencias del Seminario internacional Cómo las TIC transforman las escuelas. IIPE-UNESCO, Sede Regional Buenos Aires, UNICEF.
75. Tedesco, Steinberg y Tófaló. (2015). *Principales resultados de la Encuesta Nacional sobre Integración de TIC en la Educación Básica Argentina*. Programa TIC y Educación Básica. Informe general. Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF).



76. Secretaria de prensa de gobierno de Jujuy. (2016). Docente jujeño distinguido a nivel nacional. from <http://prensa.jujuy.gob.ar/2016/09/13/docente-jujeno-distinguido-a-nivel-nacional-visito-a-la-ministra-calsina/>